# Réparation et renforcement des maçonneries

6.3

# Réparation et renforcement **structuraux**

STRRES
NOTRE TALENT DÉFIE LE TEMPS

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / JUIN 2011

Le présent guide fait partie d'une collection de **quatre guides** intitulée **Réparation et renforcement des maçonneries.** Ces guides s'adressent aux **entrepreneurs** ayant à réaliser des **travaux de réparation et de renforcement d'ouvrages en maçonnerie** et de leurs fondations dans les domaines du **génie civil** et du **bâtiment** et, tout particulièrement, de ponts, murs de soutènement, piles et culées, aqueducs (structure porteuse et fondations) :

- FABEM 6.1 : *généralités et préparation des travaux,*

- FABEM 6.2 : *réparation non-structurale,*

- FABEM 6.3 : *réparation et renforcement structuraux,*

- FABEM 6.4 : *annexes.*

Ils peuvent s'appliquer à d'autres types d'ouvrages en maçonnerie (quais, tunnels...) sous réserve de tenir compte des particularités de ces structures et des documents techniques spécifiques existants. Ils concernent aussi les deux autres acteurs de l'opération que sont le **prescripteur** et le **contrôleur (maître d'œuvre** ou son représentant).

**Dans ces guides sont traités :**

- des documents de référence (ouvrages, guides, normes...) ;

- de l'évolution de la conception et du calcul des voûtes et murs en maçonnerie ;

- des désordres des matériaux (pierres, briques, mortiers), des fondations, des structures avec leurs causes ;

- des opérations connexes comme le nettoyage, la dévégétalisation et la préparation des surfaces ;

- de la réalisation des ouvrages provisoires (étaiements et cintres pour la mise en sécurité, ponts et passerelles provisoires de rétablissement des circulations...)

- des travaux sur les parements comme le rejointoiement, la reconstitution des pierres et des briques, la mise en œuvre de revêtements de protection... ;

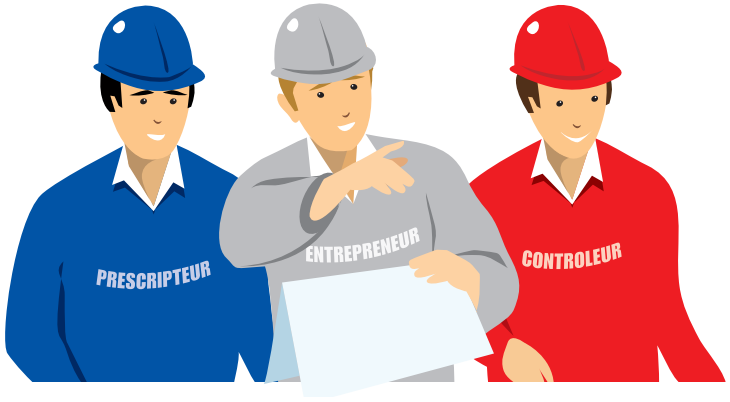
- des travaux sur les fondations et les structures comme l'injection des maçonneries, la mise en place de tirants d'enserrement, la réalisation de contre-voûtes, la reconstruction totale ou partielle... ;

- des travaux d'élargissement par le dessus ou d'augmentation du débouché... ;

- des travaux de protection contre les eaux en provenance de diverses origines...

**L'introduction des guides** insiste sur l'importance à accorder aux **études** et **investigations** pour aboutir à un **confortement efficace et durable.**


UNE EDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / JUIN 2011




*Les trois intervenants,*

# SOMMAIRE

**INTRODUCTION** ..... **7**

**MODE D'EMPLOI DES GUIDES «MACONNERIE»** ..... **8**

**1 RECONSTRUCTION PARTIELLE OU TOTALE DE PARTIES D'OUVRAGES** ..... **11**

1.1 DOMAINE D'APPLICATION ..... **12**

1.2 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE ..... **15**

1.3 ÉTUDES PRÉALABLES ..... **16**

1.4 CHOIX DES MATÉRIAUX ..... **18**

1.5 MATÉRIELS À UTILISER ..... **19**

1.6 MODES OPÉRATOIRES ..... **20**

1.7 ESSAIS ET CONTRÔLES ..... **28**

1.8 RÉCEPTION DES TRAVAUX (pour mémoire) ..... **29**

Sommaire


**2 REPARATION ET/OU RENFORCEMENT DES FONDATIONS ..... 31**

2.1 ORIENTATIONS DU PROJET DE RESTAURATION DES FONDATIONS ..... 32

2.2 QUELQUES OUVRAGES DE RÉFÉRENCE ..... 35

2.3 TRAVAUX DE PROTECTION OU DE CONFORTEMENT AGISSANT SUR LE COURS D'EAU ..... 36

2.4 TRAVAUX DE PROTECTION DES APPUIS PAR DES MASSIFS OU DES TAPIS D'ENROCHEMENT ..... 39

2.5 TRAVAUX DE PROTECTION DES FONDS DE COURS D'EAU PAR DES GABIONS ..... 50

2.6 TRAVAUX DE PROTECTION DES SOLS ET COMBLEMENT DES CAVITÉS PAR DES SACS DE SABLE ..... 54

2.7 TRAVAUX DE COMBLEMENT DES CAVITÉS PAR BÉTONNAGE ET INJECTION ..... 56

2.8 TRAVAUX DE RÉFECTION DE PIEUX ENDOMMAGÉS ..... 59

2.9 TRAVAUX DE RÉALISATION D'UN RADIER GÉNÉRAL ..... 60

2.10 TRAVAUX DE CONFORTEMENT DES FONDATIONS À L'AIDE DE PALPLANCHES MÉTALLIQUES ..... 65

2.11 PHASES D'EXÉCUTION DES TRAVAUX ..... 75

2.12 TRAVAUX D'ENCAGEMENT DES APPUIS ..... 77

2.13 TRAVAUX DE CONFORTEMENT DES FONDATIONS PAR INJECTION SANS DÉPLACEMENT DES TERRAINS ..... 81

2.14 TRAVAUX DE CONFORTEMENT DES FONDATIONS PAR INJECTION AVEC DÉPLACEMENT DES TERRAINS ..... 97

2.15 TRAVAUX D'AMÉLIORATION DE LA PORTANCE DES FONDATIONS DES APPUIS ..... 99

2.16 QUELQUES PROBLÈMES PARTICULIERS D'EXÉCUTION ..... 107

2.17 RÉCEPTION DES TRAVAUX (pour mémoire) ..... 108

**3 RENFORCEMENT STRUCTURAL DES MAÇONNERIES PAR INJECTION ..... 109**

3.1 DÉFINITIONS ..... 110

3.2 DOMAINE D'APPLICATION ..... 111

3.3 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE ..... 113

3.4 ÉTUDES PRÉALABLES À UNE INJECTION ..... 114

3.5 MATÉRIELS À UTILISER ..... 123

3.6 PRÉPARATION ET EXÉCUTION DES TRAVAUX ..... 128

3.7 ESSAIS ET CONTRÔLES ..... 131

3.8 TRAVAUX DE FINITION ..... 136

3.9 RÉCEPTION DES TRAVAUX (pour mémoire) ..... 137

**4 REPARATION ET/OU RENFORCEMENT DES STRUCTURES EN MAÇONNERIE PAR BROCHES, BOULONS D'ANCRAGE ET TIRANTS D'ENSERREMENT ... 139**

4.1 GÉNÉRALITÉS ..... 140

4.2 DOMAINE D'APPLICATION ET CONSEILS GÉNÉRAUX ..... 141

4.3 TYPES DE DÉSORDRES SUSCEPTIBLES DE RÉPARATIONS ET/OU RENFORCEMENTS PAR BROCHES, BOULONS D'ANCRAGE ET TIRANTS D'ENSERREMENT ET CHOIX DE LA TECHNIQUE À APPLIQUER ..... 143

4.4 CARACTÉRISTIQUES DES BOULONS D'ANCRAGE, BROCHES, TIRANTS D'ENSERREMENT... ET DES PRODUITS ET MATÉRIAUX CONNEXES ..... 150

4.5 MATÉRIELS À UTILISER ..... 179

4.6 PRÉPARATION ET RÉALISATION DE L'OPÉRATION ..... 195

4.7 ESSAIS ET CONTRÔLES ..... 217

4.8 RÉCEPTION DES TRAVAUX ..... 227

**5 REPARATION STRUCTURALE ET/OU RENFORCEMENT STRUCTURAL (CONTRE-VOUTES – CONTRE-MURS – CEINTURAGES – REGLAGES DE LA POUSSEE) ..... 229**

5.1 GÉNÉRALITÉS ..... 230

5.2 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE ..... 232

5.3 RÉPARATION ET/OU RENFORCEMENT PAR CONTRE-VOÛTES – DOMAINE D'APPLICATION – LIMITES D'EMPLOI ..... 233

5.4 RÉPARATION ET/OU RENFORCEMENT PAR CEINTURAGES – DOMAINE D'APPLICATION – LIMITES D'EMPLOI ..... 251

5.5 RÉPARATION ET/OU RENFORCEMENT PAR CONTRE-MURS – DOMAINE D'APPLICATION – LIMITES D'EMPLOI ..... 255

5.6 RÉPARATION ET/OU RENFORCEMENT PAR RÉGLAGES DE LA POUSSÉE DES VOÛTES – DOMAINE D'APPLICATION – LIMITES D'EMPLOI ..... 256

5.7 CHOIX DES PRODUITS ET MATÉRIAUX – MATÉRIELS NÉCESSAIRES – CONTRÔLES ET ESSAIS ..... 265

5.8 RÉCEPTION DES TRAVAUX (pour mémoire) ..... 266

**6 ELARGISSEMENT DES PONTS-VOUTES ET AUGMENTATION DE LEUR DEBOUCHE ..... 267**

6.1 CONSIDÉRATIONS SUR LES SPÉCIFICITÉS DE L'ÉLARGISSEMENT D'UN PONT EN MAÇONNERIE OU DE L'AUGMENTATION DE SON DÉBOUCHÉ ..... 268

6.2 ÉTUDES PRÉALABLES ..... 270

6.3 PRINCIPALES SOLUTIONS D'ÉLARGISSEMENT DES PONTS EN MAÇONNERIE ..... 276

6.4 PRINCIPALES SOLUTIONS D'AUGMENTATION DU DÉBOUCHÉ DES PONTS EN MAÇONNERIE ..... 300

6.5 CHOIX DE MATÉRIAUX ..... 303

6.6 RÉCEPTION DES TRAVAUX (pour mémoire) ..... 304

**TABLE DES ILLUSTRATIONS ..... 305**

Comme **l'introduction commune** à l'ensemble des **GUIDES du STRRES** le rappelle, l'expérience montre que les opérations de réparation et de renforcement de structures en maçonnerie ne sont pas toujours couronnées de succès. **Dans un certain nombre de cas, soit les réparations ne tiennent pas, soit de nouveaux désordres apparaissent à proximité des réparations, soit il se produit lors des travaux des dérapages dans les quantités et les coûts et parfois même l'effondrement partiel ou total de la structure.** Toutes ces déconvenues sont, le plus souvent, dues à la **faiblesse du diagnostic** lors des études préliminaires et aussi à la **non mise en sécurité de l'ouvrage** avant travaux.

En effet, certains **maîtres d'ouvrage** croient qu'il suffit de traiter les **désordres apparents** (par exemple, la reprise des joints dégradés, le remplacement des pierres endommagées, le rebouchage des fissures…) pour résoudre les problèmes et, qu'en conséquence, les **études préliminaires** portent uniquement sur le **relevé des désordres visibles** et sur le **métré** qui s'y rapporte.

Il a donc été décidé de rappeler dans le **chapitre 3.3** du **guide FABEM 6.1, les étapes incontournables du processus à suivre pour aboutir à une action de réparation et/ou de renforcement** qui ont été développées dans le **guide FABEM 1.**

**AVERTISSEMENT**

**Le présent document a été rédigé dans l'optique d'une opération de mise en œuvre d'une opération de réparation ou de renforcement de maçonneries lourde et complexe. Pour des chantiers de moindre importance, il peut être adapté, mais sans oublier les conséquences qui résulteraient d'une mauvaise exécution. Il est indispensable que soient respectées les exigences des normes et autres documents visés en référence et dans les annexes [FABEM 6.4].**

# 1. PREMIER CAS

La méthode à mettre en œuvre pour la réparation et/ou le renforcement a été fixée à la suite d'une étude qui a porté sur la recherche des causes des désordres et la mise au point d'un projet de réparation ou renforcement. Il reste à choisir les matériaux et produits, le matériel de mise en œuvre, à réaliser les travaux et à contrôler l'ensemble de l'opération.

Lorsque la méthode est entièrement détaillée dans un des guides «Maçonnerie», il faut suivre ses indications à toutes les étapes de l'opération, sachant que, si nécessaire, il renvoie aux autres **guides du STRRES**, voire à d'autres documents.

# 2. DEUXIÈME CAS :

La structure présente des désordres dont les causes restent floues et, bien entendu, la technique à mettre en œuvre n'est pas fixée. Dans un tel cas, il faut se reporter aux différents paragraphes et annexes des **guides «maçonnerie»** avec, si besoin est, l'aide du **guide FABEM 1**, qui décrivent :

- la conception et les principes de fonctionnement des ouvrages voûtés et des ouvrages de soutènement ;
- les différentes méthodes de calcul des ouvrages voûtés et des ouvrages de soutènement ;
- les différents désordres et leurs causes ;
- la méthodologie de réalisation d'une expertise pour aboutir à un diagnostic et un pronostic;
- la consistance d'un projet de réparation ou de renforcement ;
- les différentes techniques de réparation ou de renforcement à mettre en œuvre en fonction des désordres constatés et de leurs causes…

**> Liste des différents travaux de réparation et/ou renforcement ainsi que des opérations connexes préliminaires ou finales traités dans les guides «Maçonnerie» :**

**• dans le guide «Généralités et préparation des travaux» [FABEM 6.1] :**

- opérations connexes préliminaires et finales :
  - dévégétalisation,
  - nettoyage et préparation des parements et parois (pierres et briques),
  - nettoyage final des parements, parois, lieux… après travaux ;

**• dans le guide «Réparation non-structurale» [FABEM 6.2] :**

- travaux sur les parements :
  - jointoiement et rejointoiement,
  - joints de dilatation ou de fractionnement,
  - reconstitution des parements en pierres naturelles et en briques,
  - enduits de protection des parements et parois,
  - revêtements de protection des parements et parois ;

- travaux sur les fondations et structures :
  - remplacement du remblai des voûtes et murs – Réfection des couches d'assise et de surface des chaussées,

- travaux de protection contre les eaux :
  - recueil et drainage des eaux de surface,
  - drainage des eaux infiltrées,
  - réalisation des supports de chape et des chapes d'étanchéité,
  - traitement des remontées d'humidité.

• **dans le guide «Réparation et renforcement structuraux» [FABEM 6.3] :**

- travaux sur les fondations et structures :
  - reconstruction partielle ou totale de parties d'ouvrages après rescindement des parties endommagées,
  - réparation et/ou renforcement des fondations,
  - réparation et/ou renforcement structural des maçonneries par injection,
  - réparation et/ou renforcement structural par broches ou épingles, boulons d'ancrage et tirants d'enserrement,
  - réparation structurale et/ou renforcement structural par :
    - . contre-voûtes,
    - . contre-murs,
    - . ceinturages,
    - . réglages de la poussée.

- travaux d'élargissement et d'augmentation du débouché ;

**> Chaque méthode de réparation et/ou de renforcement est explicitée en respectant, dans la mesure du possible, la présentation type suivante :**

**1. Généralités – Domaine d'application ;**

**2. Documents de référence ;**

**3. Études préalables** - Désordres et causes (rappels succincts avec renvois à la partie consacrée à l'étiologie dans le guide FABEM 6.1 [symptômes et causes]) – Choix de la technique de réparation et/ou renforcement ;

**4. Choix des produits et matériaux ;**

**5. Matériels à utiliser ;**

**6. Préparation et exécution des travaux ;**

**7. Essais et contrôles ;**

**8. Réception des travaux.**

**> La réparation ou le renforcement d'un ouvrage en maçonnerie impose, dans la plupart des cas, de faire appel à plusieurs méthodes à la fois. Par exemple, dans le cas d'un pont voûte, il est souvent nécessaire de :**

- dévégétaliser l'ouvrage ;
- nettoyer les parements ;
- rejointoyer la maçonnerie ;
- injecter la maçonnerie pour reconstituer le mortier de hourdage ;
- enserrer les bandeaux ;
- réaliser une nouvelle chape d'étanchéité ;
- réaménager les équipements…

Pour effectuer ces différentes opérations, il est fait appel aux **méthodes décrites dans les guides.** L'attention est attirée sur l'importance de réaliser toutes les opérations nécessaires, de coordonner l'exécution des différentes méthodes, qui doivent être effectuées dans un certains ordre, dans certaines conditions climatiques, avec ou sans possibilité de décalage dans le temps…, afin de ne pas provoquer **l'apparition de nouveaux désordres ou de rendre les réparations ou le renforcement peu durables.**

**> Exemples d'erreurs à ne pas commettre :**

- réaliser une contre-voûte et refaire les joints sans s'assurer de l'efficacité de l'étanchéité et du drainage car, dans ce cas, le pont devient une véritable **«piscine»**;
- remettre en état toute la superstructure d'un pont sans s'être assuré de l'état des fondations ;
- réaliser un enduit sur les parements d'un mur en maçonnerie alors que celle-ci est affectée par des remontées capillaires…

# 1

# Reconstruction partielle ou totale de parties d'ouvrages


1.1 Domaine d'application
1.2 Documents de référence
1.3 Études préalables
1.4 Choix des matériaux
1.5 Matériels à utiliser
1.6 Modes opératoires
1.7 Essais et contrôles
1.8 Réception des travaux (pour mémoire)




UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / JUIN 2011

Un ouvrage en maçonnerie peut nécessiter la **reconstruction partielle ou totale d'une de ses parties** ayant subi un endommagement important et si les autres techniques de réparation sont inadaptées pour résoudre le problème. De plus, **si la maçonnerie est atteinte par d'autres désordres** (sensibilité au gel-dégel, drainage défectueux, remontées d'humidité et de sels…), il est impératif de procéder aux réparations correspondantes avant ou après avoir procédé aux travaux de reconstruction.

**> Les causes des endommagements peuvent être multiples. Il est possible de citer :**

- un choc comme celui d'un véhicule sur un parapet ;
- une rupture de canalisation ;
- la végétation et surtout les racines ;
- un affouillement localisé ;
- un glissement de terrain après de fortes pluies ;
- une réparation non effectuée en temps utile, soit par défaut de surveillance, soit par défaut de financement…

***Photo n° 1 : résultat d'un choc sur le parapet d'un pont en maçonnerie*** *(crédit photo Cofex Littoral)*

***Photo n° 2 : effondrement partiel d'un mur*** *(crédit photo Cofex Littoral)*

***Photo n° 3 : effondrement partiel d'une pile en maçonnerie*** *(crédit photo DDE 70)*

# 1.1 Domaine d'application



Pour réparer des désordres tels que ceux susvisés, il va falloir, après avoir mis en **SÉCURITÉ LA STRUCTURE,** si besoin est (étaiement, cintre provisoire, boulonnage…), purger la maçonnerie désorganisée et la reconstruire en faisant appel aux **diverses techniques applicables en construction neuve** aux maçonneries de pierres de taille, de moellons et de briques. Un soin particulier est à apporter à la liaison entre la maçonnerie conservée et la maçonnerie nouvelle.

- **Domaine des monuments historiques : ouvrages en maçonnerie de juin 2006** (Ministère de la Culture et de la Communication - Direction de l'Architecture et du Patrimoine).

- **Domaine du bâtiment : DTU 20.1 :** ouvrages en maçonnerie de petits éléments. Parois et murs.

- **Domaine du génie civil : le fascicule 64 du CCTG :** travaux de maçonnerie d'ouvrages de génie civil.

***NOTA :*** *si les références normatives du* ***fascicule 64*** *sont totalement obsolètes, les procédures d'exécution restent parfaitement d'actualité à condition de les adapter aux moyens de mise en œuvre actuels.*

**> Des investigations, des essais, voire des recalculs doivent être effectués pendant les études préalables. En effet, il faut :**

- déterminer les causes des désordres ;
- mettre au point les mesures de sauvegarde ;
- récupérer les pierres tombées et identifier leur position dans la structure ;
- procéder au relevé, sur un plan, de l'emplacement dans la structure de toutes les pierres qui devront être remises en place (ce relevé peut être complété par des photographies et, pour les monuments historiques ou équivalents, par la photogrammétrie) ;
- différentier les parties à rescinder ou à démolir des parties saines à conserver, identifier les matériaux de mauvaise qualité à éliminer ;
- rechercher une carrière ou une briqueterie capables de fournir les pierres ou les briques manquantes ;
- identifier le type de joint à réaliser et les mortiers à utiliser ;
- choisir les techniques de réparations complémentaires nécessaires pour redonner un fonctionnement homogène à la structure (dévégétalisation, injection de consolidation…) et assurer sa durabilité (réfection de la chape d'étanchéité et du drainage…) ;
- quantifier les travaux à exécuter…

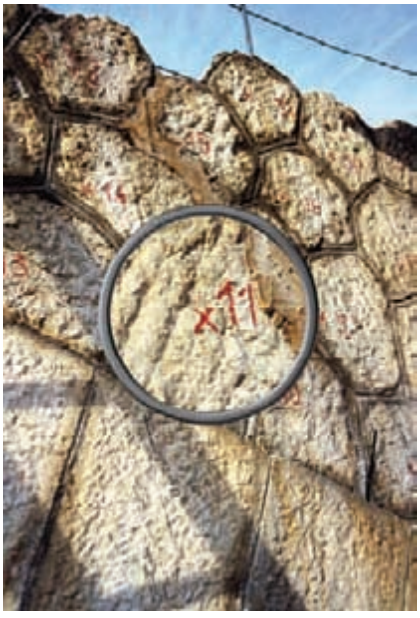



***Photo n° 4 : repérage des moellons des tympans du pont de Villeneuve-Loubet avant leur démontage*** *(crédit photo P. Vion)*

Ces investigations ont également pour but de déterminer **la ou les méthodes de nettoyage ou de préparation de surface** préalable(s) à la reconstruction partielle ou totale de parties d'ouvrage.

***Photo n° 5 : stockage des pierres récupérées après la destruction du pont de Mostar*** *(crédit photo A. Bouineau)*

# 1.4 Choix des matériaux

Se reporter au paragraphe 6.2.1 du guide FABEM 6.1 relatif au choix des matériaux de base (pierres et briques), des mortiers de hourdage et au paragraphe 1.3 du guide FABEM 6.2, relatif au choix des mortiers de rejointoiement. Il est rappelé l'importance de la compatibilité des matériaux.

> ***Rappel :*** *pour les briques, il faut se reporter à la norme* ***NF EN 771-1*** *et au complément national (CN). Il est vivement recommandé d'utiliser des ciments à faible teneur en C3A (par exemple, conformes à la norme* ***NF P 15-319).***

Les pierres et moellons destinés à remplacer ceux non réutilisables sont à choisir, sauf prescription contraire du **marché**, pour obtenir une maçonnerie quasiment identique de celle d'origine sur le plan de l'aspect, de la texture, de la couleur…. La maçonnerie ancienne qui sert de référence doit être nettoyée et ravalée, séchée avant de réaliser les planches d'essai.

Se reporter au paragraphe 1.4 du guide FABEM 6.2 relatif au choix des matériels utilisés lors d'un rejointoiement. À ceci s'ajoutent les outils du tailleur de pierre manuels ou mécaniques, les cordeaux, règles, fils à plomb, niveaux, chevillettes…

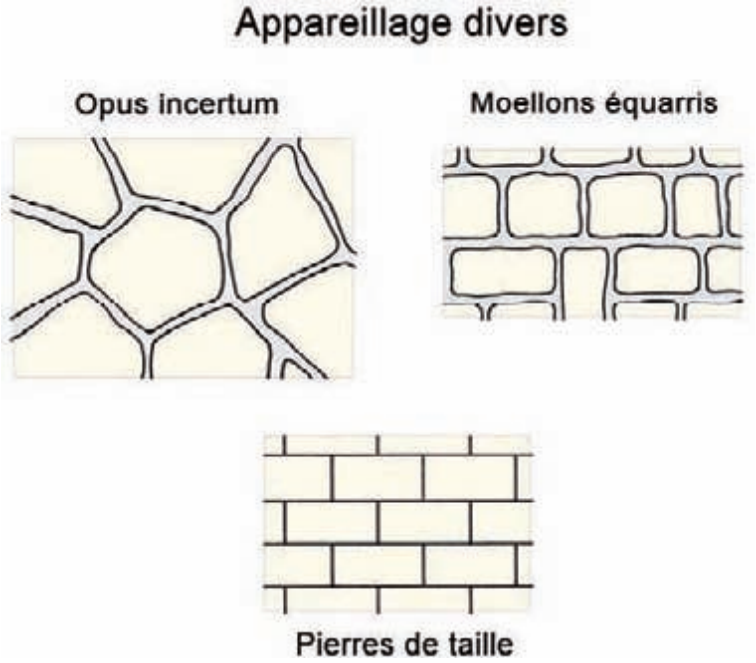



***Figure n° 1 : appareillage divers***

**> Pour tous les types de maçonneries (pierres de tailles, moellons et briques), il faut respecter les prescriptions suivantes :**

- les surfaces de jonction entre la maçonnerie ancienne et la maçonnerie nouvelle sont à repiquer, nettoyer et humidifier ;
- les pierres et briques sont arrosées à grande eau sur leur emplacement de stockage de façon à être légèrement humides au moment de leur mise en œuvre ;
- les maçonneries sont protégées contre la sècheresse par des arrosages légers mais fréquents ;
- les maçonneries doivent aussi être protégées contre la pluie et le gel ;
- en cas d'interruption de chantier, les maçonneries en cours de construction doivent être protégées et, à la reprise du travail, il faut traiter les surfaces de reprise comme ci-dessus ;
- l'emploi d'un mortier rebattu est interdit…

La mise en place d'écrans contre l'ensoleillement ou la pluie peut être prescrite par le **marché**.

***NOTA :*** *dans le domaine du bâtiment, les exigences particulières du DTU 20.1 sont à prendre en compte.*

[1] *Les prescriptions de ce paragraphe sont reprises en bonne partie de celles du* ***fascicule 64 du CCTG.***



I Retour au sommaire I

***Photo n° 6 : purge et rescindement de la maçonnerie existante*** *(crédit photo JL. Michotey)*

***Photo n° 7 : travaux de réfection terminée pour la maçonnerie de moellons assisés*** *(crédit photo JL. Michotey)*

## 1.6.1 MAÇONNERIE DE PIERRES DE TAILLE

> **L'entrepreneur doit fournir les dessins d'appareillage, lesquels doivent, normalement, respecter les exigences suivantes :**

- la longueur de parement d'une pierre doit être au moins égale au double de sa hauteur d'assise ;
- la distance entre un angle rentrant et un joint doit être au moins égale à 20 cm ;
- la distance entre un angle saillant et un joint doit être au moins égale à 35 cm ;
- le harpage entre les nouvelles pierres et les anciennes doit être assuré, sauf si un joint de dilatation ou de fractionnement est à réserver…

Il est impératif que les pierres soient taillées et posées de façon que les efforts de compression qu'elles subiront soient appliqués normalement au lit de carrière. **La pose en délit est interdite.**

**> Le marché fixe le type de pose à effectuer :**

- pose dite **«économique»** à bain de mortier, de façon que le mortier reflue et garnisse les lits et les joints et que l'épaisseur des joints et lits soit de l'ordre de 1,5 cm.
- pose dite **«traditionnelle»** sur cales en bois dur humidifiées à refus (les baguettes doivent être disposées à au moins 3 à 4 mm des arêtes pour éviter les épaufrures), le mortier étant mis en place à la fiche. Ces cales sont enlevées au minimum 24 h après la pose des pierres.

***REMARQUE :*** *le marché adapte ces exigences à l'appareillage existant.*

## 1.6.2 MAÇONNERIE DE MOELLONS BRUTS

**Les moellons sont posés à bain de mortier.** Il faut s'assurer que le mortier reflue à la surface par tous les joints ; pour ce faire, les moellons sont frappés et tassés au marteau. Les parties épaisses des joints sont remplis d'éclats de pierres enfoncés et serrés, de façon à être complètement enrobés.

En parement, il ne faut pas mettre d'éclats. À cet effet, il faut choisir des moellons de forme adaptée, de façon que l'épaisseur des joints ne dépasse pas 3 cm. Pour assurer une liaison efficace des parements avec le corps de la maçonnerie, il faut exécuter au minimum un lancis par mètre carré (un lancis correspond à mise en place d'un moellon en boutisse ou parpaigne). Le dépassement minimum d'une boutisse doit être de 20 cm.

Dans les massifs de maçonnerie de grand volume, il faut que les matériaux soient enchevêtrés dans toutes les directions de façon à éviter tout plan de fissuration préférentiel.

Dans les piles et massifs d'épaisseur limitée, qui sont sollicités en compression, il faut disposer les moellons en couches successives en respectant les plans d'assise des chaînes d'angle en pierres de taille ou moellons taillés.

Lorsque la maçonnerie est soumise à des pressions importantes (cas des voûtes), il faut disposer les moellons de façon que les lits d'arase soient orientés perpendiculairement aux lignes de pression.

Dans les murs de moins de 40 cm d'épaisseur, il faut prévoir au moins deux parpaignes par mètre carré et disposer les moellons pour bien lier les deux parements opposés.

## 1.6.3 MAÇONNERIE DE MOELLONS TAILLÉS

Les maçonneries, suivant les exigences du **marché** liées à la maçonnerie existante, sont posés à joints réguliers ou non. Les parements à joints réguliers sont réalisés par assises horizontales réglées, en respectant les lits des chaînes d'angle…

**Les moellons sont posés à bain de mortier** en prévoyant une boutisse par mètre carré avec un dépassement d'au moins 20 cm. Les joints verticaux entre les assises successives doivent respecter un décalage minimum de 10 cm. L'épaisseur des joints doit être comprise en 2 et 3 cm.

Lorsque la maçonnerie est soumise à des pressions importantes (cas des voûtes), il faut disposer les moellons de façon que les lits d'arase soient orientés perpendiculairement aux lignes de pression.

Dans les murs de moins de 40 cm d'épaisseur, il faut prévoir au moins deux parpaignes par mètre carré et disposer les moellons pour bien lier les deux parements opposés.

***Photo n°8 : reconstruction d'un tympan en moellons assisés*** *(crédit photo JL. Michotey)*

## 1.6.4 MAÇONNERIE DE BRIQUES

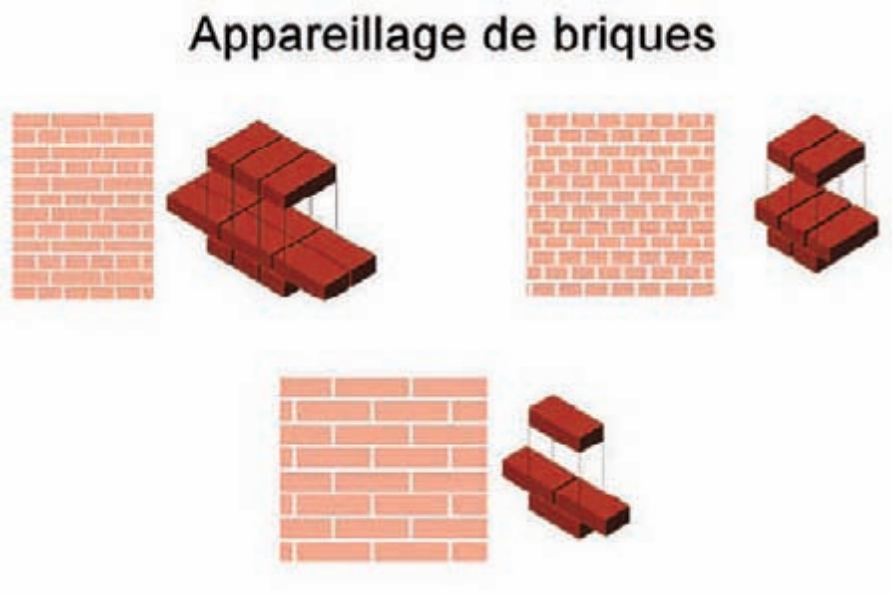



***Figure n° 2 : divers appareillage de briques*** *(extrait Wikipédia)*

**Les briques disposées en parement** doivent être obligatoirement des briques dites **«de parement»** à même de résister à l'agressivité de l'environnement.

Le **marché** fixe l'appareillage des briques en fonction des dispositions de la maçonnerie existante et de la présence de pierres de taille, par exemple dans les chaînes d'angle ou les bandeaux. Dans certaines régions peuvent exister des appareillages spécifiques associant, par exemple, la brique et des galets.

**Les briques sont posées à bain de mortier.** Les joints verticaux de deux assises successives doivent respecter un décalage minimum de 5 cm. L'épaisseur des joints horizontaux et verticaux doivent avoir une épaisseur inférieure à 2 cm. L'utilisation de baguettes permet de réaliser des joints nets et d'épaisseur constante.

Lorsque la maçonnerie est soumise à des pressions importantes (cas des voûtes), il faut disposer les briques de façon que les lits d'arase soient orientés perpendiculairement aux lignes de pression. De plus, il faut prévoir un harpage entre les différents lits pour assurer une meilleure résistance de la voûte.

Lorsque la réalisation de l'épaisseur d'un mur nécessite plusieurs briques côte à côte, il faut prévoir un harpage dans toutes les directions au moyen de briques posées en panneresse ou boutisse.

***Photo n° 9 : réfection partielle d'une voûte en briques (****crédit photo JL. Michotey)*

## 1.6.5 MAÇONNERIE POUR VOÛTES (PIERRES, MOELLONS OU BRIQUES)

**La reconstruction partielle ou totale d'une voûte** n'étant pas une opération usuelle, il n'a pas été jugé utile de développer les précautions à prendre, qui sont liées à la portée et à la prise en compte des déformations du cintre et de la maçonnerie. Il faut savoir que les petites voûtes inférieures à 8 m d'ouverture ne comportent qu'un seul rouleau et se construisent simplement en partant symétriquement des remontées vers la clef. Les voûtes moyennes, jusqu'à 30 m d'ouverture, comportent plusieurs rouleaux et nécessitent la réalisation de joints provisoires mais aussi de joints définitifs (joints dits de dilatation ou de fractionnement) à prolonger dans les tympans (les joints définitifs doivent être remplis d'un produit souple pour en assurer l'étanchéité et éviter que des détritus ne les bloquent). Ces joints sont à réaliser au niveau des naissances et de la clef.

**> La photo de la construction du viaduc de Verteuil ci-après montre que :**

- les voussoirs sont quasiment tous approvisionnés pour charger le cintre et éviter ainsi des déformations de la voûte pendant sa réalisation ;
- la réalisation de la voûte se fait symétriquement pour les mêmes raisons.

- les joints provisoires n'apparaissent pas sur la photo.

***Photo n°10 : construction du viaduc de Verteuil (16)*** *(crédit photo Gilles Pinganaud)*

***Photo n° 11 : travaux de réfection lourds*** *(crédit photo JL. Michotey)*

**> Dans le cas d'une réfection partielle, il faut s'efforcer de mettre en charge la zone réparée, par exemple :**

- si la réparation est très limitée, par un matage soigné des joints entre la maçonnerie existante ou celle mise en place ;
- si la réparation est plus importante et nécessite un cintre partiel, par l'opération du décintrement.

Consulter l'article 20 du **fascicule 64 du CCTG** et les documents visés dans les annexes (FABEM 6.4).

## 1.6.6 TRAVAUX COMPLÉMENTAIRES

**Une fois la maçonnerie montée, il faut procéder aux travaux de finition :**

**> Les parements vus sont nettoyés, ragréés puis, suivant les prescriptions du marché :**

- **jointoyés «en montant»** (ajout de mortier de pose et lissage à la truelle, ces travaux étant exécutés de bas en haut)
- **jointoyés en reprise** ou après coup (dégarnissage en montant des joints sur une profondeur égale à deux fois l'épaisseur de leur mortier de pose et mise en œuvre d'un mortier plastique plus fortement dosé que le mortier de pose. Ces travaux étant exécutés de haut en bas, ils permettent d'obtenir une étanchéité des joints).

**> Les parements en pierres de taille calcaires sont ravalés.**

Se reporter à la 1ère partie du guide FABEM 6.2 consacrée au rejointoiement et au paragraphe 6.4 du guide FABEM 6.1 consacré au nettoyage.

## 1.7.1 ÉPREUVE DE CONVENANCE

**Une épreuve de convenance** est exécutée par **l'entrepreneur** avant le début des travaux. Elle fait, sauf disposition contraire du **marché**, l'objet d'un **POINT D'ARRÊT** levé par le **contrôle extérieur,** au vu du respect des exigences du **marché** et de la **procédure d'exécution** et de l'aspect de la réparation terminée.

La levée du **POINT D'ARRÊT** est conditionnée par la validation par le **maître d'œuvre** de **l'épreuve de convenance** de reconstruction.

Pour réaliser cette **épreuve de convenance,** le **marché** impose une **surface de référence existante** qui sert de modèle pour l'appareillage, les joints et le parement et, contradictoirement, le **maître d'œuvre** et **l'entrepreneur** choisissent une des zones à réparer appelée **«planche d'essai»** sur laquelle **l'entrepreneur** va exécuter les réparations prévues au **marché**.

**> Se reporter au paragraphe 1.6 ci-dessus relatif aux modes opératoires :**

- mise en place des étaiements, cintres… provisoires ainsi que des échafaudages,
- purges et rescindement de la maçonnerie à réparer ;
- mise en place des protections contre les intempéries ou le soleil et aussi pour limiter les projections aux alentours ;
- nettoyage, dépoussiérage et humidification des surfaces de reprise ;
- montage de la maçonnerie ;
- rejointoiement ;
- travaux complémentaire et de finition…

Au cours de cette épreuve sont contrôlés les rendements, la qualité du travail effectué, le respect des exigences du **marché** en matière d'appareillage (en particulier du harpage), de joints, de couleurs et de finition de forme et de surface.

> ***Rappel :*** *les contrôles de convenance portent aussi sur les produits, matériaux et composants, le matériel, la présence et la compétence du personnel d'exécution et la préparation du mortier.*

## 1.7.2 CONTRÔLE D'EXÉCUTION

Le **contrôle** porte sur le respect de la **procédure** et la comparaison entre les réparations en cours de réalisation et les résultats obtenues sur la planche d'essai.

**Se reporter au paragraphe 5.11 du guide FABEM 6.1.**

# 2 Réparation et/ou renforcement des fondations


2.1 Orientations du projet de restauration des fondations

2.2 Quelques ouvrages de référence

2.3 Travaux de protection ou de confortement agissant sur le cours d'eau

2.4 Travaux de protection des appuis par des massifs ou des tapis d'enrochement

2.5 Travaux de protection des fonds de cours d'eau par des gabions

2.6 Travaux de protection des sols et comblement des cavités par des sacs de sable

2.7 Travaux de comblement des cavités par bétonnage et injection

2.8 Travaux de réfection de pieux endommagés

2.9 Travaux de réalisation d'un radier général

2.10 Travaux de confortement des fondations à l'aide de palplanches métalliques

2.11 Phases d'exécution des travaux

2.12 Travaux d'encagement des appuis

2.13 Travaux de confortement des fondations par injection sans déplacement des terrains

2.14 Travaux de confortement des fondations par injection avec déplacement des terrains

2.15 Travaux d'amélioration de la portance des fondations des appuis

2.16 Quelques problèmes particuliers d'exécution

2.17 Réception des travaux (pour mémoire)




UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / JUIN 2011

# 2.1 Orientations du projet de restauration des fondations

**> Le projet de restauration, de réparation ou de confortement d'une fondation ancienne, d'un appui en maçonnerie ou d'un ouvrage en béton nécessite de disposer des analyses préalables suivantes :**

- le diagnostic d'état et de comportement des fondations et des structures sur la base d'observations, d'auscultations et d'analyses avec recherche des actions des éléments agressifs et connaissance des caractéristiques de l'environnement hydraulique, en particulier ;
- le pronostic de comportement et recherche des risques encourus provoqués par les agressions subies et à venir et sous les charges appliquées ;
- la recherche et l'identification précise des origines des dégradations sur les matériaux et des réductions des sécurités de l'ouvrage.

Les origines des désordres dans les fondations sont à rechercher dans les actions des écoulements résultant du comportement morphologique de la rivière et dans la constitution des obstacles créés par la présence des appuis dans le lit du cours d'eau.

*Le lecteur est invité à se reporter à au paragraphe 4.3.11 du* ***guide FABEM 6.1*** *intitulé :* ***altérations et désordres des fondations.***

**> Ces désordres, dans les fondations, se manifestent généralement comme suit :**

- affouillements généraux des sols alluvionnaires conduisant à des réductions des propriétés mécaniques des sols et des érosions au pourtour des appuis, ainsi que des cavités formées par érosion sous les massifs ;
- modifications des écoulements et abaissements du lit et de la ligne d'eau suite aux extractions de granulats et à l'augmentation des profondeurs des chenaux ;
- érosion du lit par réduction de la section d'écoulement suite à des remblaiements ou des culées implantées en avancée dans le lit ;
- augmentation des débits instantanés de crue occasionnés par des aménagements urbains et effet d'obstacle à l'écoulement provoqué par l'ouvrage ;
- érosion, abrasion des matériaux des éléments constituant les fondations et dissolution des mortiers ;
- création de fosses d'érosion du lit en aval à cause de l'effet de seuil noyé des fondations enchâssées dans des massifs d'enrochements trop généreux ou dans de larges massifs en béton.

**> Pour retrouver les sécurités de la fondation, le projet doit répondre aux grandes orientations suivantes :**

- respecter l'environnement hydraulique, au sens de ne pas modifier les conditions de l'écoulement et, en principe, en cherchant à les améliorer au droit du franchissement ;
- protéger les éléments de fondation et les sols contre les actions des eaux, de manière à conserver les structures existantes sans réduire pour autant les sections hydrauliques ;
- rétablir les encastrements des massifs d'appui et les contacts avec les sols par des comblements appropriés ;
- restaurer et améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs des fondations et des sols d'appui pour supprimer les tassements ;
- répartir les pressions sur le sol dues aux charges de l'ouvrage par l'ajout d'une structure additionnelle respectant les conditions des écoulements ;
- exceptionnellement, reprendre en sous-œuvre, partiellement ou totalement, la fondation existante pour substituer, à cette ancienne fondation traversant un horizon compressible, une nouvelle correctement fondée ;
- reprendre, en sous-œuvre, la fondation existante par une nouvelle fondation disposée latéralement à l'existante et constituant l'assise d'une nouvelle structure venant se substituer à l'ouvrage d'origine.

Ces grandes orientations des travaux doivent tenir compte du fonctionnement et du comportement global de l'ouvrage. Le transfert des charges dans un ouvrage en maçonnerie se fait essentiellement, voire exclusivement, par des actions de compression qu'il importe de conserver sans les modifier. Il faut privilégier les techniques de restauration des fondations qui conservent le fonctionnement de ces ouvrages en maçonnerie, voire en béton.

**> L'appréciation de l'état d'un ouvrage reste un problème difficile et ceci, d'autant que les informations tirées des observations et des reconnaissances sont limitées. La prudence doit alors guider le projeteur quant aux choix des moyens à mettre en œuvre et à l'établissement des procédures et des séquences des opérations. A cet égard, il est recommandé, selon les cas :**

- de reconstituer d'abord la continuité entre l'appui et le sol support en comblant les cavités existantes et celles qui seraient masquées à l'observateur ;
- de procéder à un renforcement, provisoire, des caractéristiques mécaniques des sols selon une procédure adaptée pour réduire ou supprimer les tassements en cours et résister aux augmentations des charges, avant de mettre en œuvre les opérations lourdes de confortement ;
- d'étayer les parties instables, voire de mettre les voûtes sur cintres provisoires et, si besoin, de ceinturer les appuis fracturés.

Dans tous les cas, il y a lieu de tenir compte de l'environnement hydraulique de l'ouvrage et d'améliorer, autant que faire se peut, les conditions de l'écoulement des eaux au droit du pont.

Les travaux de confortement d'une fondation peuvent affaiblir momentanément les sols de fondation, par exemple à la suite de dégarnissage des massifs d'appui, de forages dans les sols, d'incorporation de coulis de ciment, de terrassements locaux, cette modeste liste n'étant pas limitative. En conséquence, les cadences d'exécution de ces travaux doivent être examinées avec précision et selon une procédure détaillée analysant les conséquences de chacune des opérations. **Le non-respect de ces principes peut conduire à de graves désordres.**

***Photo n° 12 : effondrement d'un pont en maçonnerie en cours de travaux*** *(crédit photo D. Poineau)*

- **Jean-Pierre Levillain :** Protection des sols autour des appuis d'un ouvrage d'art sur la Loire à Nantes (Colloque sur la Gestion des Ouvrages d'art de l'ENPC en octobre 1994 – Presses des Ponts) ;
- **Jean-Pierre Levillain :** Mise en œuvre d'un filtre géotextile sous 10 à 15 mètres d'eau (Colloque francophone – Rencontres Géosynthétiques à Bordeaux des 12 et 13 octobre 1999).

## 2.3.1 GÉNÉRALITÉS

Avant d'intervenir sur un ouvrage, il faut s'interroger sur les actions et les évolutions de la rivière. Un objectif des travaux permettant d'assurer le bon comportement des fondations et d'améliorer leur sécurité peut être de limiter ou de supprimer la ou les causes des désordres dus aux actions de l'écoulement du cours d'eau sur les sols au pourtour proche ou lointain des appuis. Des aménagements sur le cours de la rivière peuvent contribuer largement à limiter ces actions de l'eau ou supprimer ces agressions.

**Ces travaux d'aménagements de type hydraulique** listés ci-après sont seulement cités sans description détaillée. Nous renvoyons le lecteur aux ouvrages spécialisés et aux bureaux d'études spécialisés dans ce domaine. En effet, ces travaux nécessitent en tout état de cause des études hydrauliques spécifiques comportant l'examen de l'alimentations du bassin versant du secteur aménagé ou modifié, des levés bathymétriques nombreux et une analyse détaillée des lois de l'écoulement dynamique du cours d'eau dans différentes sections.

## 2.3.2 SUPPRIMER LA OU LES CAUSES HYDRAULIQUES DES DÉSORDRES

Ces travaux ont pour objet de fixer le lit de manière à ce que les courants et le chenal d'indentation[2] dans les alluvions ne divaguent pas dans la plaine et ne provoquent pas des agressions irréversibles aux fondations. Dans des rivières naturellement instables, on procédera à la fixation du lit par des aménagements, comme les digues longitudinales, les épis ou les murs guideaux, tout en conservant un débouché hydraulique suffisant.

**> Dans les rivières où des aménagements, comme les barrages ou les seuils, entraînent la modification du débit solide, il y aura lieu de prévoir l'une des dispositions suivantes :**

- réalimenter la rivière artificiellement ;
- amener des apports solides équivalents ;
- installer un seuil en aval de l'ouvrage bloquant à son tour le transit sédimentaire ;
- provoquer des chasses de barrages.

Dans des rivières exploitées comme carrières de granulats, le débit solide est réduit, voire totalement annulé. La rivière va utiliser l'énergie de l'écoulement pour creuser son lit et abaisser les fonds en déchaussant les fondations qui y sont implantées. Pour rétablir l'équilibre et retrouver la ligne d'eau initiale, il y a lieu d'interdire les dragages dans le lit mineur. Il est nécessaire d'y établir des seuils successifs permettant de retrouver les lignes d'eau initiales et de maintenir puis de rétablir le fond du lit par les apports de l'amont. Néanmoins, sur ces rivières, l'évolution des dégradations se poursuit pendant plusieurs dizaines d'années après la fin des extractions. Ces modifications du niveau du lit mettent ainsi les ouvrages en péril pendant très longtemps après la fin des exploitations.

[2] *Zone où les eaux creusent le fond du lit du cours d'eau. Les crues peuvent provoquer la divagation du chenal dans le lit majeur.*

De même, les améliorations des conditions de navigation par des coupures de méandres conduisent à modifier le comportement morphologique de la rivière en augmentant sa pente moyenne d'écoulement. De tels aménagements conduisent à des abaissements des fonds en amont avec déchaussement des fondations et comblement par des atterrissements en aval, nécessitant des dragages d'entretien. De tels aménagements doivent être réalisés avec la création de barrages et d'écluses permettant de conserver la pente d'équilibre normal et initial de l'écoulement.

## 2.3.3 LES AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES - PRINCIPES À SUIVRE

### 2.3.3.1 Généralités

Les objectifs poursuivis par les aménagements hydrauliques sont de canaliser les courants et de maintenir les orientations des écoulements aux abords des fondations des ouvrages. Les principes à suivre ci-après sont décrits sans renter dans les détails.

**> Les différents types d'aménagements permettant d'atteindre ces objectifs sont :**

- le seuil en rivière ;
- les murs guideaux disposés en amont des appuis ;
- les panneaux de fond permettant de fixer un chenal d'écoulement privilégié ;
- les digues longitudinales canalisant la rivière et empêchant sa divagation ;
- les épis de maintien d'un chenal d'écoulement ;
- la modification du tracé de la rivière par des digues et des épis pour supprimer la cause des désordres sur l'ouvrage et assurer la pérennité d'un traitement.

**> En tout état de cause, il est nécessaire de réaliser une étude hydraulique donnant :**

- l'extension des lits mineurs et majeurs ;
- les courbes des débits (attention aux modifications intervenues sur les bassins versants) ;
- les profils en travers du lit ;
- le profil en long ;
- la nature des fonds ;
- la position du courant dans le lit et la forme de l'érosion et son évolution à venir.

## 2.3.3.2 Le seuil en aval des ouvrages

### 2.3.3.2.1 Objectif

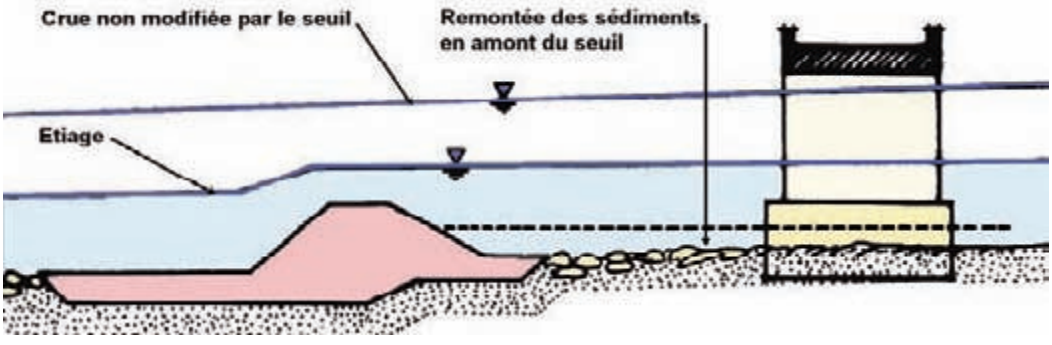
Construit à l'aval de l'ouvrage, il stabilise les fonds moyens et la ligne d'eau. Cependant, cet aménagement déplace le problème de l'abaissement du lit à l'aval du seuil (se reporter à la figue n° 3 ci-après). Il ne supprime pas l'affouillement général et local autour des appuis.

### 2.3.3.2.2 Caractéristiques du seuil

**> Il est nécessaire, dans le respect de la loi sur l'eau, de déterminer les éléments suivants :**

- la position du seuil par rapport au pont ;
- la cote supérieure du seuil : il doit conserver les cotes de crue sans les amplifier ;
- la configuration du radier aval du seuil (L = 3H) et tapis de protection à étudier spécifiquement (choix des matériaux, disposition, épaisseur, ...),
- le choix des matériaux de l'ouvrage ;
- la passe à poissons ;
- si besoin, l'implantation d'autres seuils en aval ;
- la procédure d'exécution à étudier avec précision et dans les détails.

***NOTE :*** *dans la formule ci-devant L représente la largeur du seuil et H sa hauteur.*



# 2.4.1 LES MASSIFS OU TAPIS D'ENROCHEMENTS - OBJECTIFS DE CES PROTECTIONS

## 2.4.1.1 Les massifs ou tapis d'enrochement font partie de la fondation

Les travaux de lutte contre les affouillements, par la protection des fonds et des éléments des fondations sensibles à l'abrasion ou à la dissolution des chaux, consistent à mettre en œuvre des tapis ou des talus d'enrochements au pourtour des fondations. La méthode est ancienne et aussi vieille que les ouvrages. La présence d'enrochements assure une protection superficielle du lit, elle comble les fosses et cavités, elle présente une résistance contre les chocs d'embâcles ou de bateaux et donne un encastrement aux appuis et elle évite les détériorations par abrasion des pièces de bois de la fondation ; puis, en limitant les circulations des eaux au contact des massifs, les enrochements réduisent les dissolutions des chaux. Lors de la construction de certaines fondations, le talus d'enrochement assure la butée des rideaux de vannage contre la poussée du béton frais ou il encage et encastre les pieux émergeants du lit.

Les massifs de protection en enrochement font ainsi très souvent partie intégrante de la fondation en assurant la stabilité latérale des pieux vis-à-vis de leur déversement et en protégeant les éléments bois d'origine de la fondation contre les abrasions.

Par contre, ces massifs d'enrochement mis en œuvre au pourtour de l'appui constituent, par leur masse et leur largeur, un obstacle conséquent à l'écoulement, en réduisant la section hydraulique. Ils doivent donc être dimensionnés correctement, tant en blocométrie qu'en géométrie, pour tenir dans le courant et assurer les butées latérales des appuis sans exagération de leur dimension.

**> Les objectifs de la mise en œuvre des enrochements peuvent se décliner comme suit :**

- éviter les affouillements généralisés et les pertes de portance des sols mobilisés en assurant la présence d'une charge sur ceux-ci ;
- empêcher les affouillements locaux creusant des souilles par entrainement des grains, par arrachement ou par érosion des matériaux des fonds en amont des appuis par les courants perturbés par l'obstacle ;
- empêcher les phénomènes d'érosion interne pénétrant sous la carapace d'entraîner les grains du sol, de former des cavités ou l'enfouissement des blocs en bordure par les vortex qui se développent à cause des écoulements perturbés sur la surface rugueuse ;
- limiter ou éviter les circulations des eaux au contact des éléments de la fondation ;
- contribuer à la tenue et à la stabilité des fondations en assurant un encastrement des massifs ou le contreventement latéral aux pieux.

## 2.4.1.2 Différentes utilisation des massifs ou tapis d'enrochement

**> Répondant aux objectifs, les fonctions des enrochements disposés en tapis ou en talus peuvent être les suivantes :**

- assurer une protection du lit au pourtour des appuis pour lutter contre les affouillements sous forme de radier ou de talus de faible hauteur ;
- réaliser un comblement des fosses et des cavités ;
- constituer une protection contre les chocs de bateaux ou les corps flottants ;
- jouer le rôle d'un écran vis-à-vis des écoulements le long des massifs ;
- constituer un massif de butée latérale aux fondations sur pieux ;
- former des seuils en travers, en aval de l'ouvrage ;
- constituer des perrés et des berges pour assurer la protection des abords.

## 2.4.1.3 Principe général des dispositions des protections en enrochements

Une bonne disposition des tapis d'enrochements au pourtour des fondations est d'adopter en plan une géométrie dont la largeur est égale à 2 fois la largeur de la pile. Les débords en amont et en aval doivent également respecter la valeur de deux fois la largeur de la pile. Ce tapis d'enrochements de protection est à encastrer, autant que faire se peut, sous le niveau moyen du lit de la rivière de manière à ne pas faire obstacle à l'écoulement (se reporter à la figure n° 4).

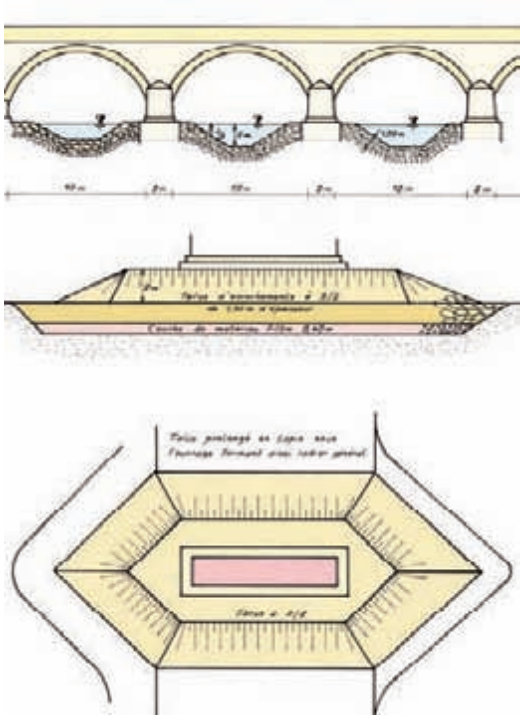


***Figure n° 4 : principe de la protection par des enrochements encastrés dans le lit***

## 2.4.1.4 Dispositions des protections des fondations anciennes

Sur les fondations anciennes, les protections sont à maintenir en talus sur tout le pourtour de l'appui, surtout si ce sont des fondations sur pieux recépés au-dessus du niveau du lit ou des massifs de béton de chaux encagés dans un rideau de vannage en bois (se reporter à la figure n° 5).

a). cas d'une fondation superficielle sur massif de béton de chaux ;

b). cas d'une fondation sur pieux en bois et platelage.

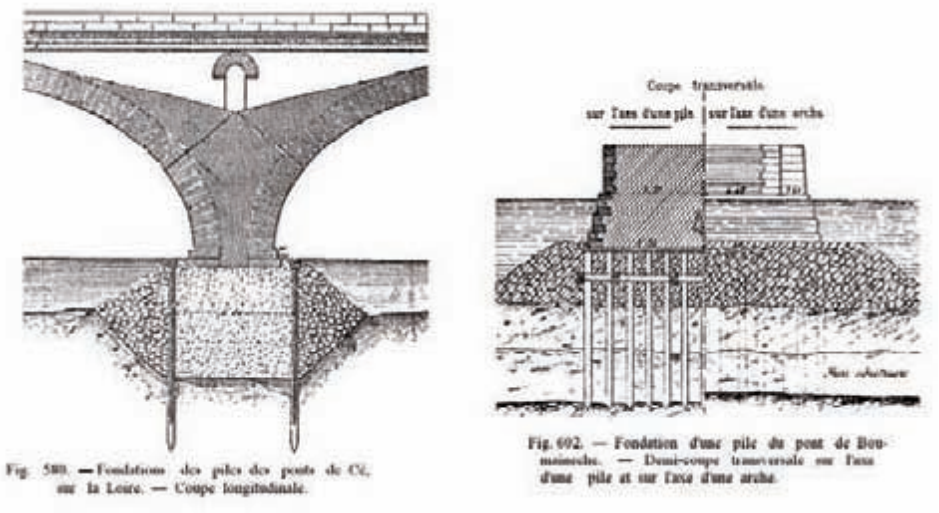


***Figure n° 5 : protection de fondations anciennes par des talus d'enrochement***
*(extrait du tome II du traité des ponts en maçonnerie et tunnels de J ; Chaix et Chambaret*
*Éditeur : Fanchon et Artus [Paris] vers 1889)*

Ces enrochements ont pour objet d'éviter l'érosion du lit au contact des fondations et de limiter ou de supprimer les circulations d'eau au pourtour des massifs de fondation ou sous les platelages et entre les pieux.

Si la **blocométrie** des matériaux mis en œuvre est trop **homométrique**[3] ou trop grossière avec des gros blocs, des circulations d'eau se produisent entre les blocs et des vortex se développent dans les interstices. Ils arrachent les grains de sol situés en arrière du talus ou sous la couche d'enrochements.

En pied du talus du massif de protection, par défaut de couche filtre intermédiaire et en bordure de la protection, les sols sont arrachés et mobilisés lors des crues et perdent leur portance. Les blocs d'enrochement s'ensouillent et disparaissent dans les alluvions devenues mobiles. Le talus devient instable par perte de son assise en pied. Ces massifs doivent alors être entretenus et rechargés. Contrairement à ce qui est trop souvent pratiqué, les travaux d'entretien des talus doivent être réalisés en pied pour assurer la butée au talus et non pratiqués par un rechargement en haut de talus.

[3] *Des enrochements homométriques sont des enrochements dont les éléments sont de taille voisine.*

Le niveau haut des massifs de protection au pourtour des fondations ne doit pas être exagéré. Ce niveau haut de la protection doit juste correspondre à la partie supérieure de la base de l'appui. Il ne faut pas monter la protection au niveau haut du massif affleurant ou au-dessus de la ligne d'eau d'étiage.

## 2.4.1.5 Dimensions des enrochements - des matériaux élaborés

### 2.4.1.5.1 Les objectifs à respecter par l'enrochement

Pour que les enrochements participent aux protections des fondations, ils doivent répondre à de nombreux critères pour respecter les objectifs assignés. De ce fait, les enrochements sont des matériaux élaborés qui demandent que l'on établisse des directives précises de fourniture. L'enrochement de protection des sols n'est pas constitué de blocs bruts provenant directement de l'abattage au front de taille d'une carrière mais, par contre, c'est un matériau de carrière parfaitement élaboré qui doit répondre à des **exigences sévères de calibrage.** Il s'agit ici de matériaux mis en œuvre dans une eau animée d'un écoulement linéaire et perdant son énergie par frottement. Cette action est totalement différente de celle des houles et des vagues en site portuaire ou côtier.

En site fluvial, il faut éviter les circulations de filets liquides au sein de la **carapace**. Seule, la rugosité de surface assure la perte d'énergie de l'écoulement. Le sol en arrière du tapis ou du talus d'enrochement ne doit pas être soumis aux mouvements d'eau, que ce soient des courants ou des phénomènes de surpression-dépression.

**> En conséquence, le tapis d'enrochement doit répondre aux conditions suivantes :**

- présenter une surface aussi plane que possible, continue, sans aspérité ni trou sur toute la superficie du tapis, la rugosité n'étant obtenue que par les surfaces des blocs ;
- respecter une blocométrie continue du matériau de telle manière que les enchevêtrements soient assurés et que les cavités entre les blocs soient minimales, voire aussi fermées que possible pour garantir un calage naturel des blocs entre eux ;
- rester perméables pour assurer un équilibre des pressions entre l'intérieur et l'extérieur de la carapace afin d'éviter les arrachements des grains du sol ;
- constituer un enchevêtrement grâce à des blocs de toutes les dimensions pour présenter un angle de frottement interne aussi élevé que possible ;
- avoir une masse volumique des blocs la plus dense possible et supérieure à 26,5 kN/m$^3$.

**> Ces conditions imposent :**

- des blocs aux dimensions calibrées et étudiées pour assurer les conditions d'une continuité blocométrique très régulière de toutes les dimensions des cailloux constituant le tapis ;
- des contraintes de réalisation des blocs de manière à garantir une qualité et un respect de la blocométrie exigée. La fabrication sera aussi industrielle que possible et non artisanale comme celle qui consiste à casser le bloc d'abattage au brise-roche hydraulique monté sur une pelle.

### 2.4.1.5.2 Détermination du diamètre moyen du bloc et de la blocométrie

■ Diamètre du bloc moyen

Si plusieurs auteurs et de nombreuses études peuvent être exploités pour définir le diamètre moyen du bloc, la méthode souvent retenue consiste à exploiter la relation empirique due à **Isbach** qui est :

$$V_c = 1{,}2\sqrt{2g\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}}.\Delta \quad (1)$$

Avec :

Vc : la vitesse critique (Vc = 2 Vm et Vm la vitesse moyenne du courant)
(vitesse critique : Vc = 2 Q/S pour un débit de crue Q de période de retour de l'ordre de 20 ans)

g : l'accélération de la pesanteur

$\gamma_S$ : la masse volumique du bloc

$\gamma$ : la masse volumique de l'eau

$\Delta$ : la dimension du bloc moyen (diamètre équivalent du bloc).

**> L'influence du talus d'enrochement de pente $\beta$ est prise en compte sous la forme :**

$$\lambda = \cos\beta\left(1 - \frac{tg^2\beta}{tg^2\varphi}\right)^{1/2} \quad (2)$$

Avec :

$\beta$ : l'angle du talus d'enrochement

$\varphi$ : l'angle de frottement interne du matériau de protection

$$\Delta = 0{,}7.\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma}.\frac{V_c^2}{2g}.\frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

Si la rivière est en courbe, on adopte une vitesse moyenne majorée de 10 à 30% soit : $V_{mc}$ = 1,10 à 1,30.$V_m$.

La relation donne théoriquement le $\Delta_{50}$ et donc un poids moyen. Cependant, nous considérons que, pour les écoulements fluviaux le long des fondations où l'on ne cherche pas une dissipation de l'énergie, le $\Delta_{50}$ est généralement surévalué. La relation d'Isbach est établie pour la protection des avals des radiers. **Il faut donc réduire le $\Delta_{50}$** obtenu **en adoptant $\Delta_{50}$ Isbach = $\Delta_{75}$ du fuseau blocométrique d'enrochement de protection des appuis d'ouvrages fluviaux.**

A partir du $\Delta_{75}$ ainsi obtenu, le fuseau de blocométrie est déterminé de telle sorte que les cailloux présentent des diamètres équivalents en progression continue entre les petits et les plus gros.

■ **Blocométrie du matériau enrochement**

**La courbe granulométrique du fuseau est donnée par :**

$\Delta_{100}$ = 1,15 à 1,3 $\Delta_{75}$

$\Delta_{75}$ = $\Delta_{50}$ Isbach

$\Delta_{50}$ = 0,7 à 0,6 $\Delta_{75}$

$\Delta_{15}$ = 0,25 à 0,3 $\Delta_{75}$

$\Delta_{0}$ = 0,07 à 0,15 $\Delta_{75}$

**De plus, il faut vérifier que :**

$$\frac{\Delta_{100}}{\Delta_0} = 10 \text{ à } 12 \quad et \quad \frac{\Delta_{75}}{\Delta_{15}} \geq 5$$

### 2.4.1.5.3 Géométrie des blocs

**> On doit vérifier également que la géométrie du bloc respecte les conditions suivantes :**

■ Le rapport dimensionnel :

$$2 \leq \frac{(L+G)}{2E} \leq 3 \quad et \quad \frac{L}{G} \leq 3$$

L : la plus grande longueur du bloc

G : la plus grande dimension mesurable perpendiculairement à L

E : la plus grande dimension perpendiculaire au plan de G.

### 2.4.1.5.4 Dimensions de la carapace

La carapace doit avoir une épaisseur de 2 à 3 $\Delta_{50}$ et il faut prévoir une butée de pied si le talus est de pente supérieure ou égale à 2/1. Si le talus est dressé à 3/1, il n'y a pas besoin de butée de pied. La largeur de la protection sera en moyenne de 1,5 à 2 fois la largeur de la pile sur tout le pourtour de la fondation.

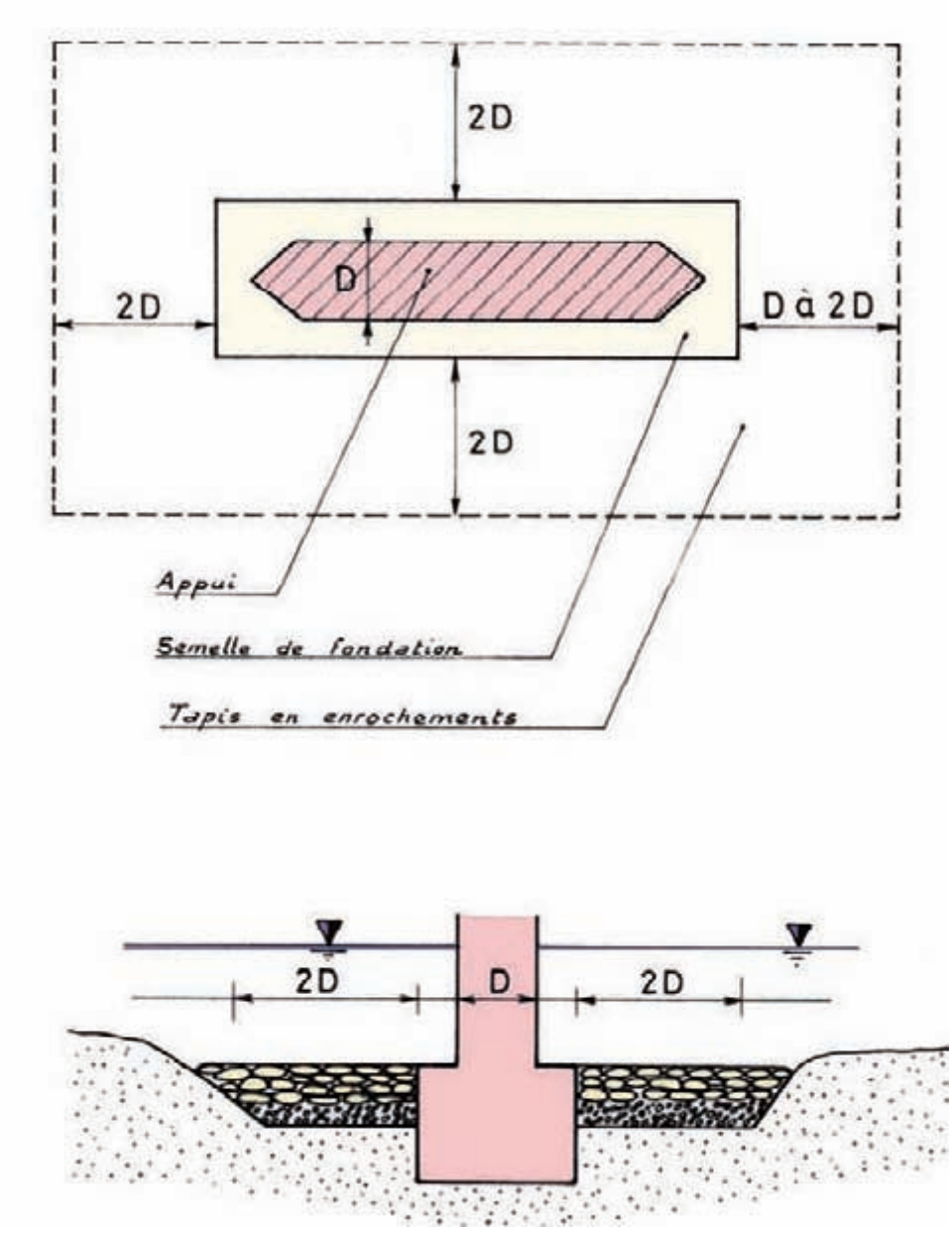



*Figure n° 6 : dispositions à respecter lors de la réalisation d'une protection par enrochements*

### 2.4.1.5.5 Dimensionnement de la couche filtre

La couche filtre à disposer sous les enrochements doit avoir une épaisseur moyenne de 0,30 m à 0,50 m et doit, normalement, être réalisée à sec pour assurer une mise en œuvre correcte du matériau (épaisseur constante, tapis continu et régulier en altitude).

**> Le matériau filtre devra répondre aux critères suivants :**

$$\Delta_{15} < 5.d_{85}$$

$$4\ d_{15} < \Delta_{15} < 20.d_{15}$$

$$\Delta_{50} < 25.d_{50}$$

Avec :

d : la dimension du filtre

Δ : la dimension de l'enrochement.

**> La mise en œuvre du matériau filtre sous l'eau est très difficile à réaliser. On est souvent conduit à adopter les dispositions suivantes :**

- augmenter notablement les dimensions du filtre en adoptant des matériaux de type 10/100 mm ou même 40/200 mm selon les conditions de mise en œuvre dans un courant ;
- adopter une blocométrie de l'enrochement complétée par des matériaux fins de type 10/100 mm mélangés et homogénéisés à la fourniture pour n'avoir qu'une seule mise en œuvre de matériau. Cette disposition est tout-à-fait envisageable dans la mesure où elle ferme la couche de protection ;
- mettre en œuvre un filtre en géosynthétique qui permet d'assurer une très bonne protection des sols fins contre les érosions et les filtrations. Par ailleurs, le filtre géosynthétique peut être plus facilement continu en adoptant des recouvrements suffisants. Il présente l'avantage de ne pas augmenter l'épaisseur de la carapace de protection. Toutefois, sa difficulté de mise en œuvre sous eau dans un courant limite son emploi sous les enrochements. Une procédure précise de mise en œuvre doit être élaborée et adoptée par les différents intervenants.

### 2.4.1.5.6 Exemple de dimensionnement d'enrochements

Il s'agit de protéger des fondations disposées dans une rivière où la vitesse moyenne en crue de période de retour 20 ans atteint 2 m/sec. Le tapis est disposé horizontalement au pourtour de la fondation d'où $\lambda = 1$.

**> A partir de la relation ci-dessus et pour une masse volumique du matériau de 2,7 t/m³, on obtient :**

$$\Delta_{75} = 0{,}7 \frac{1}{2{,}7 - 1} \cdot \frac{4^2}{2.9{,}81} .1 = 0{,}35\ m$$

**> D'où les diamètres moyens du fuseau granulométrique :**

$\Delta_{100}$ = 0,50 m

$\Delta_{75}$ = 0 ,35 m (0,315 à 0,40m)

$\Delta_{50}$ = 0,20 m à 0,25 m

$\Delta_{15}$ = 0,08 m à 0,10 m

$\Delta_{0}$ = 0,03 m à 0,007 m

**> On adopte la blocométrie représentée sur la figure n° 7 répondant aux spécifications ci-dessous :**

Passant à 30 mm = 0%

12% ≤ 100 mm ≤ 20%

25% ≤ 140 mm ≤ 35%

45% ≤ 250 mm ≤ 60%

60% ≤ 315 mm ≤ 75%

400 mm < 100%

Ce sont des blocs anguleux d'un poids compris entre 4 et 60 kg, d'un poids moyen de 15 à 40 kg et d'un poids maximum de 90 kg pour le plus gros bloc isolé et autorisé.

Pour faire filtre en interface avec le sol et pour assurer une mise en œuvre garantissent une bonne fermeture et un enchevêtrement des blocs, il est possible d'augmenter la proportion d'éléments relativement fins de type 20/60 mm et même ajouter des matériaux de type 10/40 mm.

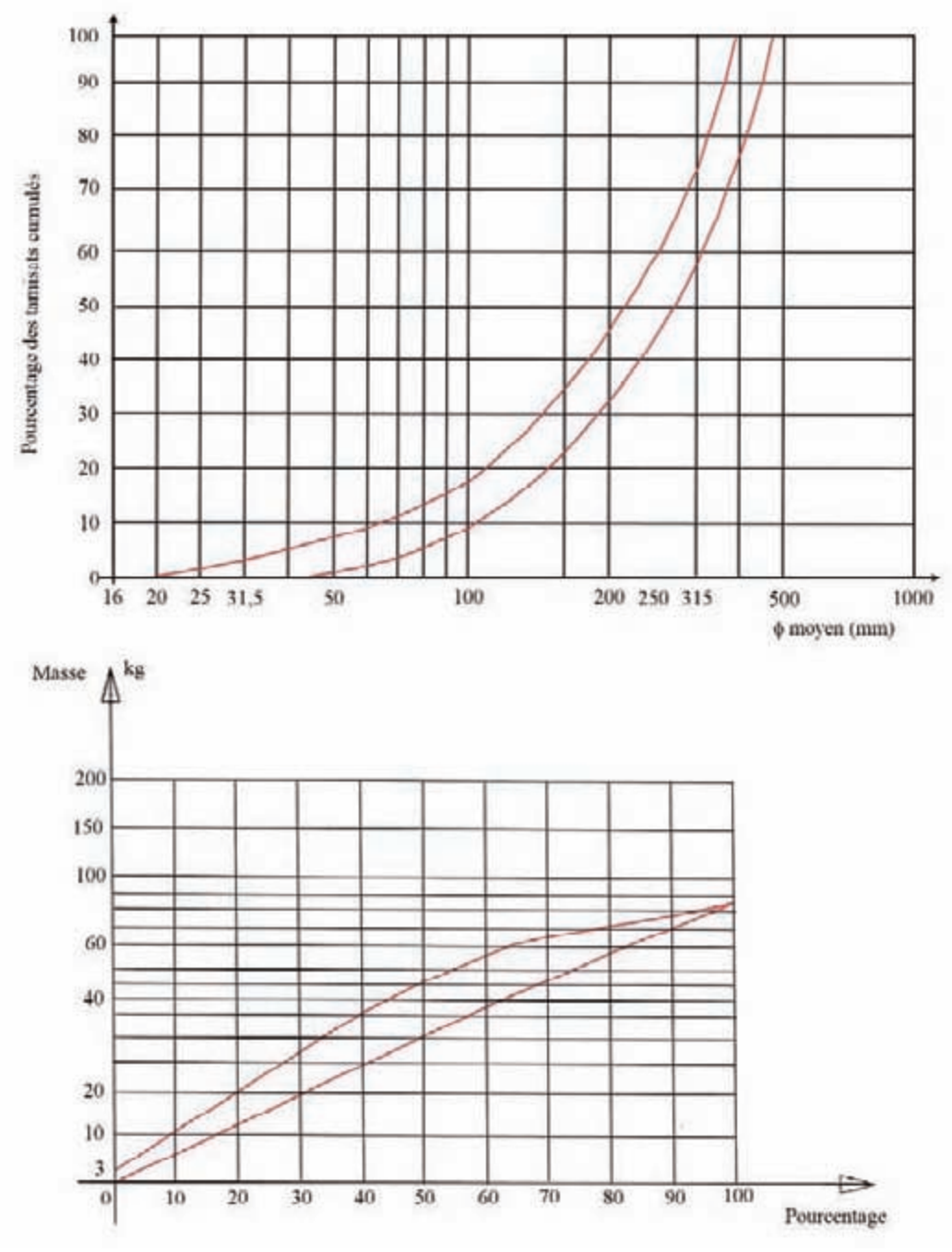



*Figure n° 7 : fuseau blocométrique d'enrochement (4 à 60 kg) et blocométrie des enrochements (4 à 60 kg)*

## 2.4.1.6 Mise en œuvre des enrochements

La mise en œuvre des enrochements demande beaucoup de soin. Le déversement souvent observé de blocs en vrac ne correspond pas à une mise en œuvre correcte, efficace et pérenne. Elle conduit à une ségrégation contraire aux objectifs de répartition régulière des blocs et de bon enchevêtrement. De même, le griffage de la surface des matériaux déposés ou le ratissage de celle-ci conduit à des arrachements et des désenchevêtrements néfastes à la bonne tenue du tapis et provoquant une ségrégation.

La mise en œuvre correcte nécessite des travaux préalables de terrassement pour réaliser l'encastrement du tapis ou du pied du massif. Elle nécessite une pose par volume limité, sans provoquer de ségrégation. Les blocs répartis régulièrement selon la blocométrie définie doivent être déposés et calés par des opérations de serrage avec le dos du godet et l'appui de la pelle pour obtenir une surface sans aspérité ni creux.

Les enrochements forment une carapace perméable qui ne doit en aucun être bétonnée. Les blocages illusoires par déversement de béton entre les blocs se traduisent toujours par une désorganisation de la protection à brève échéance par suite des érosions qui se produisent sous la carapace.

# 2.5.1 PRINCIPE DU GABION D'ENROCHEMENTS - DESCRIPTION SCHÉMATIQUE

## 2.5.1.1 Généralités

Le gabion d'enrochement est constitué d'une cage métallique à mailles hexagonales de type grillage fort de forme parallélépipédique remplie de cailloux. La géométrie de la cage est adaptée à la configuration des travaux à réaliser. Elle peut varier du bloc à section carrée, de 1 m x 1 m par exemple, sur 2 m de longueur ou plus, à des éléments de 0,50 m x 1 m ou encore 0,30 m x 1 m, voire à des éléments plats de 0,20 m d'épaisseur mais de grande surface.

La géométrie des gabions peut également être cylindrique, d'un diamètre de 0,65 m ou 0,95 m et d'une longueur variant de 2 à 3 m. Ces gabions sont constitués également de grillage à maille hexagonale à double torsion.

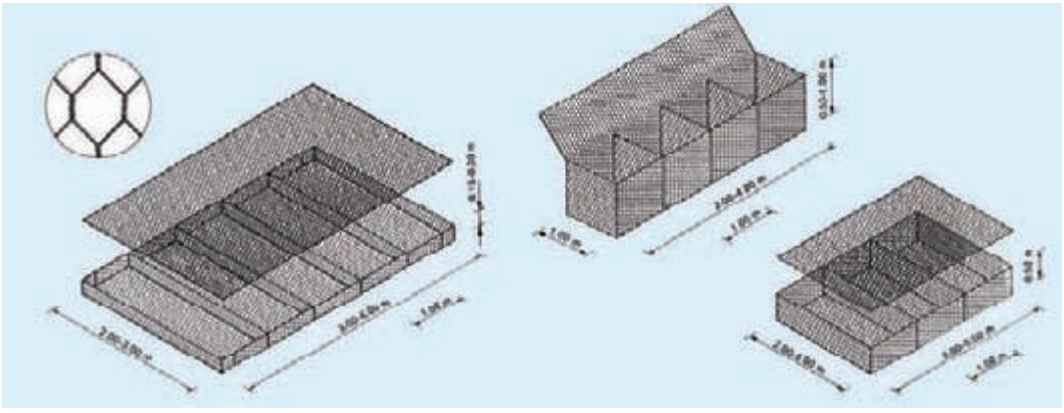


*Figure n° 8 : gabions*

## 2.5.1.2 Le fil du grillage

Le fil en acier doux galvanisé à chaud a un diamètre de 2,20 à 3,20 mm. Il peut être recouvert de PVC en protection. Le fil employé a une résistance à la traction de 38 à 50 kg/mm$^2$ (373 à 490 N/mm$^2$).

## 2.5.1.3 Intérêt du procédé

Il s'agit d'un produit industriel, préfabriqué sur le site ou à proximité et présentant des garanties d'exécution que l'on sait maîtriser. C'est une structure lourde résistant par sa masse et restant perméable.

La blocométrie des blocs est adaptée à l'épaisseur des gabions, ce qui permet de mettre en œuvre des cailloux présentant peu de vides entre eux. Étant préfabriqué à terre, le gabion peut être muni d'un tissu géotextile au contact du sol pour assurer le rôle de filtration. Cet élément peut être continu en réalisant un recouvrement des débords des filtres géotextiles au moment de la pose.

L'intérêt de ce procédé est de pouvoir réaliser des liaisons entre les éléments, de monter des murs de soutènement ou de protection, de concevoir des tapis minces et continus recouvrant le sol au pourtour et adaptés à la topographie des fonds du lit du fait de leur possibilité de suivre les déformations du support.

## 2.5.2 EXEMPLES DE RÉALISATION

### 2.5.2.1 Gabions disposés en buton de coffrage

Dans cet exemple, il s'agissait de réaliser un comblement d'une cavité formée sous un massif de béton de chaux. Pour ce faire, le coffrage en palfeuille 2300 a été maintenu latéralement par des gabions (figure 9).

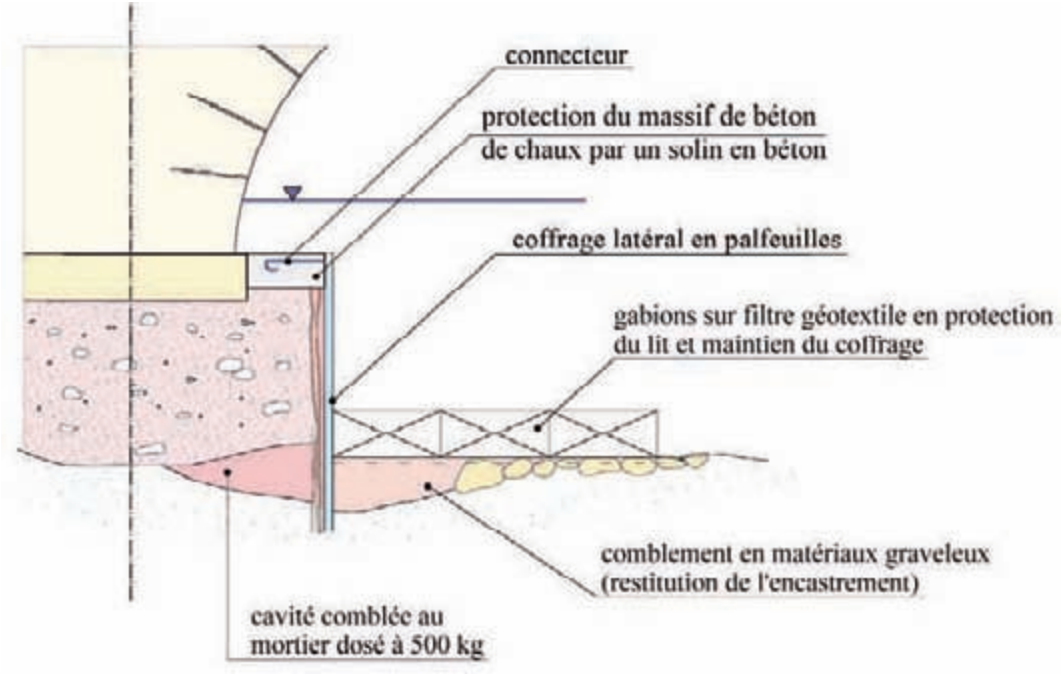

connecteur
protection du massif de béton de chaux par un solin en béton
coffrage latéral en palfeuilles
gabions sur filtre géotextile en protection du lit et maintien du coffrage
comblement en matériaux graveleux (restitution de l'encastrement)
cavité comblée au mortier dosé à 500 kg

*Figure n° 9 : exemple de gabions disposés en buton de coffrage*

## 2.5.2.2 Protection des sols au pourtour des appuis

Les tapis de gabions de faible épaisseur permettent de rendre la surface des fonds du lit non érodable, sans pour autant réduire la section d'écoulement. Un exemple de pose de tapis préfabriqués de grande surface (60 à 80 m² en 0,50 m d'épaisseur soit une masse de 60 à 80 tonnes) est montré sur la figure n° 10 ci-après. Il s'agit de recouvrir 15 000 à 25 000 m² de surface du lit par un tapis continu. Les gabions munis en sous-face d'un filtre géotextile débordant sont disposés de manière à obtenir une surface continue de protection. Chaque surface unitaire de gabions est descendue au palonnier à charge répartie par de très nombreuses suspentes. Se reporter aux documents visés au paragraphe 2.1 ci-dessus : "Protection des sols autour des appuis d'un ouvrage sur la Loire à Nantes" et "Mise en œuvre d'un filtre géotextile sous 10 à 15 m d'eau".

La description et les dispositions de mise en œuvre font référence aux normes gabions : **NF P94-325.1** et **NF P94-325.2.**

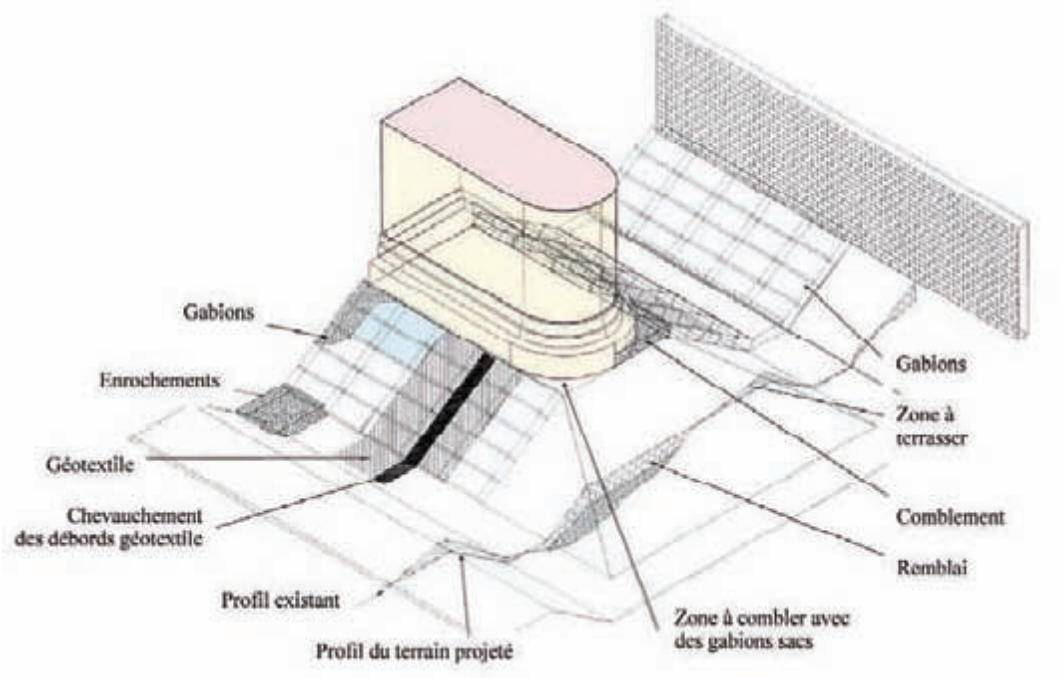



***Figure n° 10 : exemple de pose d'un tapis de gabions munis de filtre géotextile en protection des fonds de rivière***

## 2.5.3 QUELQUES PRÉCAUTIONS DE MISE EN ŒUVRE

En protection des fonds de rivière, le tapis de gabions doit être disposé sur des pentes relativement douces dressées ne dépassant pas la valeur de 1/2. En effet, le filtre géotextile indispensable en sous-face pour empêcher la migration des particules et sols fins sous l'action des vortex est également un plan potentiel de glissement sur une pente. La résistance au cisaillement du tapis sur filtre géotextile reposant sur le sol doit être vérifiée préalablement. La stabilité de la pente doit également être assurée.

Les gabions doivent être posés avec des **tolérances** respectant le non-recouvrement entre deux nappes et un écart maximal tolérable (en général inférieur à 20 cm en tous points).

Élément souple, le gabion doit être manipulé à l'aide de palonniers mais, en aucun cas, les attaches ne doivent être réalisées sur le grillage. Pour assurer les manutentions, sont utilisées, soit des suspentes en acier de type Fe E 235 et de 8 mm de diamètre, soit des sangles passant en dessous du gabion et pouvant servir à maintenir le filtre géotextile disposé en sous-face. Chaque suspente doit reprendre une charge de 0,2 à 0,4 tonne au maximum, ce qui conduit à prévoir plus d'une centaine de suspentes pour les manutentions des grandes nappes.

Comme tout élément dur reposant sur un lit de matériaux alluvionnaires mobiles, il peut se produire des érosions du sol support provoquées par les courants. Cette érosion apparaît à l'interface d'un milieu raide ou rigide, le gabion, avec un milieu meuble, le sol. L'érosion peut atteindre selon le sens de l'écoulement par rapport à la bordure du tapis une profondeur de 1 à 2 m environ. La bordure du tapis de gabion descend alors dans la fosse d'érosion et sa géométrie s'adapte au creusement local du lit (se reporter à la figure ci-après).

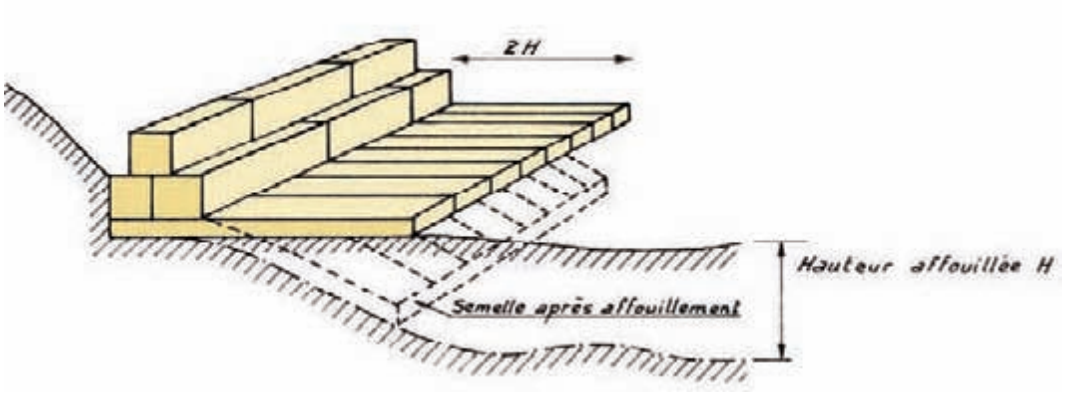



***Figure n° 11 : ensouillement de la bordure d'un tapis de gabions par affouillement***

## 2.6.1 LE SAC DE SABLE

Le sac de sable est un produit permettant d'obtenir toutes les géométries adaptées aux configurations des fondations et des sols au pourtour. En effet, le sac de sable est fabriqué à la demande à partir de toile géosynthétique qui est cousue selon la géométrie imposée par son lieu de pose. S'il est mis en œuvre par des scaphandriers, sa dimension maximale est limitée par la masse que ce dernier peut transporter et mettre en œuvre en fonction des conditions hydrauliques. Le sac de sable est un élément lourd, se comportant bien dans l'eau et s'adaptant très facilement à la topographie des fonds du fait de sa très grande souplesse.

**> Les différents constituants de ce matériau sont, d'une part, l'enveloppe et, d'autre part, le sable :**

- le sable peut présenter toute granulométrie et, cependant, doit être relativement propre avec un pourcentage de fines inférieur à 15% ou 20%. Le sable peut être gros, voire être un granulat de type 0/31,5 mm, mais, plus il est gros, plus son adaptation à la géométrie de la protection à mettre en œuvre diminue ;
- l'enveloppe est de préférence un géosynthétique non tissé ou tissé qui est cousu à la demande pour former des sacs. Elle peut être en toile de jute ou encore constituée de sacs en plastique fort (en réemploi par exemple) pour créer des petits batardeaux de faible hauteur.

## 2.6.2 UTILISATION DES SACS DE SABLE

Plus généralement utilisé dans des travaux d'urgence ou provisoires, ils permettent de combler des cavités sans nécessiter la mise en place de coffrages latéraux ou permettent de réaliser une protection des fonds au pourtour d'un appui affouillé.

L'intérêt de leur utilisation est, soit de conserver une possibilité d'un démontage aisé lors de travaux de confortement plus conséquents en ne les conservant pas, soit de les garder en place dans le cadre d'un confortement définitif de appuis. Ainsi, la figure n° 12 donne l'exemple de confortement provisoire du pont Henri IV du XVI$^{e}$ siècle à Châtellerault sur la Vienne. Destinés à rétablir la continuité de l'appui et des descentes de charge en comblant les énormes cavités décelées sous les maçonneries dans le substratum de calcaire, ces sacs ont été conservés lors des travaux de définitif.

Les cavités, comblées par des sacs de sable et fermées latéralement par un voile parafouille en béton armé, ont été injectées et clavés au coulis de ciment. La présence des sacs de sable limite notablement le volume de coulis tout en garantissant un très bon report des charges verticales exercée.

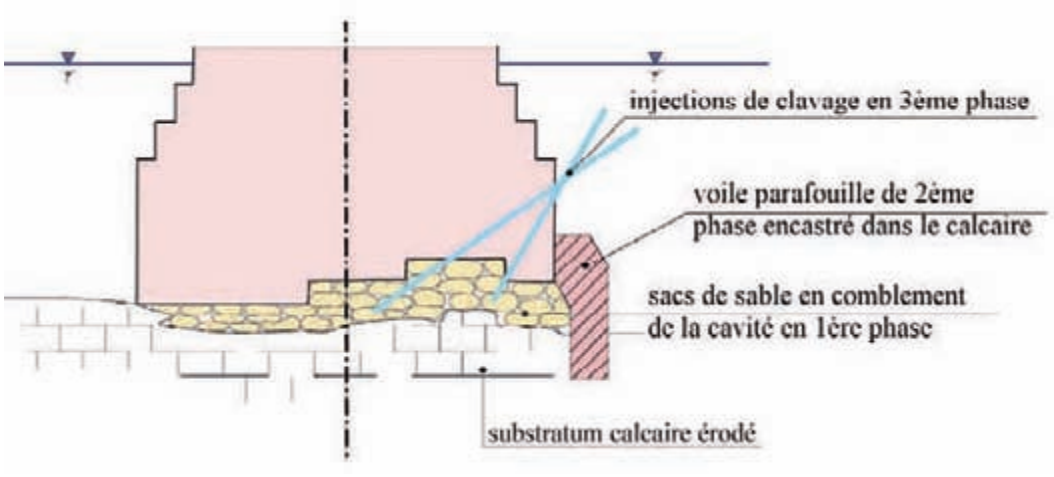

injections de clavage en 3ème phase
voile parafouille de 2ème phase encastré dans le calcaire
sacs de sable en comblement de la cavité en 1ère phase
substratum calcaire érodé

***Figure n° 12 : exemple de comblement de cavité par des sacs de sable ultérieurement injectés après réalisation d'un voile parafouille périphérique***

## 2.7.1 ORIGINE DES CAVITÉS

Les massifs de fondations superficielles en béton de chaux ou en maçonnerie, parfois le corps de la maçonnerie de la base des appuis et plus souvent le sol d'assise présentent parfois des cavités.

**> Parmi les causes d'apparition de ces désordres, on peut citer :**

- la dissolution des mortiers de chaux et l'altération du massif de béton de chaux par entraînement des laitances du mortier ;
- l'action mécanique des écoulements perturbés autour de l'appui entraînant les matériaux fins situés au pourtour et sous la base de celui-ci ou provoquant la désorganisation interne d'un corps de pile par circulation d'eau ;
- l'érosion et l'abrasion des sols et roches tendres de fondation, des semelles et massifs par l'action des écoulements.

Ces désordres, parfois masqués à l'observation de l'inspecteur, mettent fréquemment en cause la stabilité des appuis. Ils peuvent conduire à une ruine brutale par rupture d'un équilibre instable. **Le confortement des appuis comportant des cavités est donc essentiel.**

Selon le type de cavité, les travaux de comblement ou de restauration des stabilités seront différents.

## 2.7.2 TRAITEMENT DES CAVITÉS LARGEMENT OUVERTES AU POURTOUR DU MASSIF

Ce comblement vient restaurer un massif de béton de chaux présentant une large cavité latérale dans une fondation présentant une stabilité encore assurée.

**> Les travaux peuvent être conduits selon les opérations élémentaires suivantes :**

- enlèvement des débris et nettoyage de la fondation (lance à eau) ;
- mise en place d'un coffrage localisé ou général lorsqu'il est envisagé de constituer une enveloppe protectrice ou « peau en béton » ;
- scellement d'armatures destinées à liaisonner la partie existante et la partie comblée ;
- nettoyage complémentaire ;
- réalisation du ferraillage dans la partie à bétonner ;
- mise en place dans les cavités de tubes métalliques destinés à compléter le comblement par injection d'un coulis de mortier. Cette mesure est à considérer si la géométrie des

cavités laisse craindre que des zones puissent être mal comblées lors du bétonnage, compte tenu des faibles pressions de refoulement envisageables. Ces tubes doivent être des tubes métalliques rigides, munis d'obturateurs provisoires, cintrés, pour déboucher en surface. Les plus petits tubes ont généralement pour diamètres 20/27, les plus courants 40/49. L'extrémité des tubes, obturée provisoirement pendant le bétonnage, doit être disposée à distance du fond et protégée afin que le mortier injecté après bétonnage puisse atteindre les vides restants et les boucher. Une précaution minimale consiste à biseauter l'extrémité des tubes. Enfin, ces tubes peuvent parfois être munis de connecteurs et constituer une armature complémentaire de la partie réparée ;

- bétonnage proprement dit, qui selon qu'il est possible et souhaitable ou non d'épuiser la cavité en totalité ou en partie, se réalise conformément à l'une ou l'autre des procédures suivantes :

  - après épuisement, bétonnage à sec avec mise en œuvre du béton par vibration,

  - réalisation en deux phases, béton immergé sur une hauteur de 0,80 m minimum, puis épuisement et bétonnage à sec avec vibration du béton ;

- injection d'un coulis bentonite-ciment ou d'un mortier, selon les cas, pour compléter le comblement par bétonnage ;

- recépage des injecteurs et remplissage de ceux-ci par un coulis après lavage ;

- ferraillage et bétonnage d'une couverture de fermeture.

***NOTE :*** *les cavités dans un massif de maçonnerie de moellons assisés mis hors d'eau sont comblées par des moellons rendus solidaires des pierres en place par matage de mortier. Cette technique est décrite :*

- dans la 3ème partie du guide FABEM 6.2 : reconstruction des parements en maçonneries de pierres et briques ;

- dans la 1ère partie du présent guide : reconstruction partielle ou totale de parties d'ouvrages.

## 2.7.3 COMBLEMENT DE CAVITÉS ÉTROITES DÉBOUCHANT EN PÉRIPHÉRIE

Le processus est comparable au précédent en disposant des injecteurs de diamètres différents dont les extrémités sont décalées, à savoir : injecteurs de petit diamètre en fond de trou et injecteurs de plus gros diamètre proche de l'ouverture de la cavité. Après bétonnage, l'injection est à réaliser à l'aide d'un mortier par les gros injecteurs et se termine par un coulis introduit par les petits injecteurs. Dans un tel cas, il est difficile d'armer la cavité à combler.

## 2.7.4 COMBLEMENT DE CAVITÉS INTERNES NON ACCESSIBLES DIRECTEMENT

Le comblement est conduit en combinant les procédés de remplissage de la cavité par du mortier et par injection de coulis. Pour l'exécution et la conduite de l'injection, il y a lieu de se référer aux précautions présentées dans le paragraphe 2.12 ci-après et dans la 3ème partie du présent guide consacrée aux injections.

## 2.7.5 COMBLEMENT DE LACUNES SOUS LES FONDATIONS SUPERFICIELLES

La mise en place d'éléments de coffrage doit être conduite avec beaucoup de prudence. Le battage d'un rideau de palplanches venant servir de coffrage à proximité de l'appui en état de stabilité précaire est à proscrire. Les éléments doivent être disposés dans des souilles creusées à l'avancement et remblayées immédiatement. Il faut veiller à ne pas provoquer d'éboulement ou de départ de matériau du sol d'appui.

Un comblement provisoire par des appuis ponctuels selon la longueur de la cavité est à assurer par une intervention de scaphandriers mettant en œuvre des sacs de sable ou de ciment en calage provisoire.

Avant de procéder au comblement, il est nécessaire de pouvoir éliminer des dépôts de matériaux de mauvaises caractéristiques avec étaiement, au besoin, des parties instables de l'appui. Après bétonnage de la cavité reconstituant la surface portante, une injection de clavage est souvent recommandée. Elle a pour objet de serrer les matériaux de mauvaise qualité restés bloqués dans la cavité et d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols de fondation.

**> La reconstitution de têtes de pieux en bois détruites par abrasion ou par l'action d'eaux chimiquement agressives a déjà été effectuée dans quelques cas. La méthodologie de mise en œuvre a été la suivante :**

- La partie supérieure altérée une fois recépée (les parties dégradées doivent être éliminées totalement), le contact avec le platelage fut rétabli par un remplissage d'un mortier de ciment injecté dans un forage télescopique (figure n° 13). Ces travaux ont été exécutés sous l'eau par des scaphandriers après dégagement des alluvions à la lance à eau sous pression. En général, l'altération des têtes de pieux n'étant pas le seul désordre existant, il faut, en particulier, procéder au maintien des pieux par frettage latéral dans des enrochements à blocométrie continue et adaptée.

- Les pieux en béton peuvent eux aussi être détériorés par abrasion ou par altération chimique. Dans certains cas, il est possible de les réparer en disposant, après nettoyage, une gaine (coffrage en bois, métallique ou en matériaux composites [figure n° 14]) dont l'espace annulaire est injecté. Sur toute la hauteur libre, si les pieux ne peuvent être protégés autrement, il est souhaitable de disposer un chemisage pouvant résister aux agressions constatées, par exemple, un chemisage métallique.

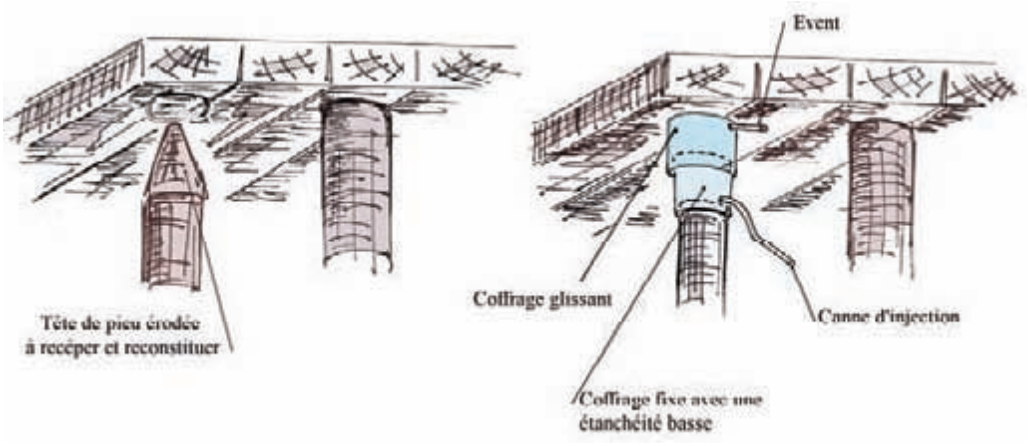



***Figure n° 13 : Réparation d'une tête de pieu en bois sous un platelage***

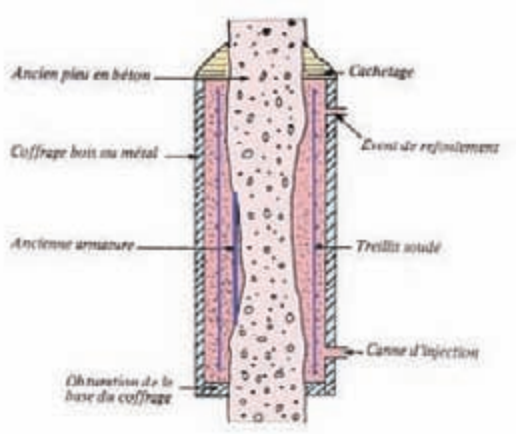



***Figure n° 14 : principe de réparation d'un pieu en béton armé par gainage***

## 2.9.1 OBJECTIFS DE LA RÉALISATION D'UN RADIER GÉNÉRAL

**Le radier,** tout autour des différents appuis, consiste à recouvrir le fond du lit du cours d'eau d'un tapis non-érodable généralement conçu sous forme d'une dalle en béton armé continue pour les ouvrages de portée modeste. Le radier peut également être constitué de blocs d'enrochements judicieusement dimensionnés ou de gabions plats disposés selon un pavage continu, ou encore de dalles en béton armé articulées sur un filtre géotextile.

Cette technique de protection des fonds est ancienne, mais elle était peu employée. Elle était mise en œuvre avec l'aide d'une charpente bois formant des casiers qui étaient remplis d'enrochements ou de béton de chaux. Le radier ancien était parfois en maçonnerie de moellons de faible épaisseur, constituant alors un véritable pavage, mais sans débord, ni en amont, ni en aval. Il n'était pas toujours muni de rideaux parafouille amont et aval. Parfois, l'ouvrage était fondé directement sur le radier en maçonnerie établi en contre-voûte, ce dernier constituant l'élément porteur de fondation de l'appui.

Sur certains ouvrages, ce radier avait également un rôle de buton entre les appuis pour éviter le basculement des culées soumises à la poussée des terres des remblais d'accès établis sur sols compressibles. Dans ce cas, le radier buton, comme la contre-voûte, participent largement à la tenue de l'encastrement des fondations et à leur stabilité.

## 2.9.2 ÉTUDE TECHNIQUE D'UN RADIER

**> L'étude technique d'un radier porte sur la détermination des éléments suivants :**

- sa forme ;
- sa cote ;
- son extension à l'amont et à l'aval ;
- ses rideaux parafouilles (dimensions) ;
- les contraintes imposées au chantier ;
- les sous-pressions (présence d'évents) ;
- la formulation du béton qui doit être compact et avoir de bonnes caractéristiques.

Le radier général de protection doit, de préférence, être réalisé à sec à l'abri d'un batardeau de palplanches fiché en amont et en aval des appuis. Sur des cours d'eau importants, il y a lieu de procéder par demi-ouvrage avec un rideau transversal à réaliser sous une des voûtes, qui permet de fermer le batardeau. Les palplanches sont arasées par recépage en fin de travaux et ces rideaux de palplanches sont conservés comme voiles parafouilles.

## 2.9.3 AVANTAGES DU RADIER

- un bon écoulement des eaux ;
- un linéaire de palplanches faible ;
- une exécution aisée (pas de battage sous voûte sauf pour les ouvrages de grande largeur qui nécessitent de fractionner les travaux dans le lit de la rivière) ;
- une protection très efficace des appuis du pont.

Un radier en béton armé forme un corset autour des différents appuis avec ou non des remontées latérales au pourtour de chaque appui de manière à participer au report des efforts exercés sur le sol.

## 2.9.4 INCONVÉNIENT DU RADIER

Le radier fixe la cote des fonds et, pour ce faire, il y a lieu de le disposer nettement en dessous des fonds moyens de la rivière. Il doit laisser libre le transit des sédiments charriés par la rivière en crue et ne pas former un seuil transversal.

***REMARQUE :*** *le radier général en béton armé peut remonter latéralement sur les massifs de fondation auxquels il assure une protection et un maintien latéral, voire un encagement complet assurant un frettage aux massifs de fondation en maçonnerie ou en béton de chaux.*

## 2.9.5 CAS DES RADIERS EN BÉTON ARMÉ

### 2.9.5.1 Conception d'un radier en béton armé

Une coupe de principe est donnée par les figures n° 15 et 16 ci-après. Un radier en béton armé est construit après mise à sec des appuis. Ces travaux de batardage sont recommandés pour permettre un nettoyage correct du lit, réaliser un fond de forme de géométrie adaptée au débouché souhaité et, surtout, pour mettre en œuvre le béton en le vibrant pour qu'il pénètre dans les cavités et qu'il soit compact.

Les extrémités du radier doivent impérativement être défendues par des parafouilles empêchant toute circulation d'eau en sous-face avec entraînement des sols ou empêchant l'érosion régressive par l'aval.

Les radiers doivent être munis d'évents régulièrement disposés. Les évents sont de simples trous forés dans le béton, sans mettre en œuvre de crépine ou autres dispositifs. Ces évents ont un simple rôle d'équilibrage des pressions au-dessus et au-dessous du radier, sans provoquer d'écoulement vertical d'eau.

Les corsets à édifier au pourtour des appuis doivent présenter une section transversale aussi réduite que possible. Généralement, ils sont trop hauts et trop larges. Il faut considérer que le radier en béton armé forme une large poutre horizontale au pourtour des massifs de fondation ou des maçonneries et constitue ainsi un renforcement des structures.

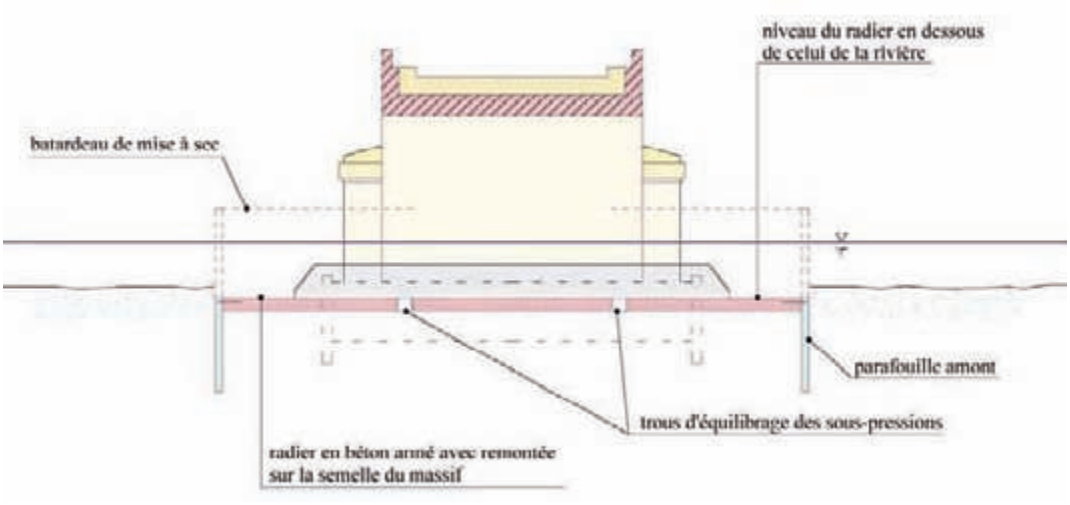

niveau du radier en dessous de celui de la rivière
batardeau de mise à sec
parafouille amont
trous d'équilibrage des sous-pressions
radier en béton armé avec remontée sur la semelle du massif

*Figure n° 15 : schéma de principe du radier général*

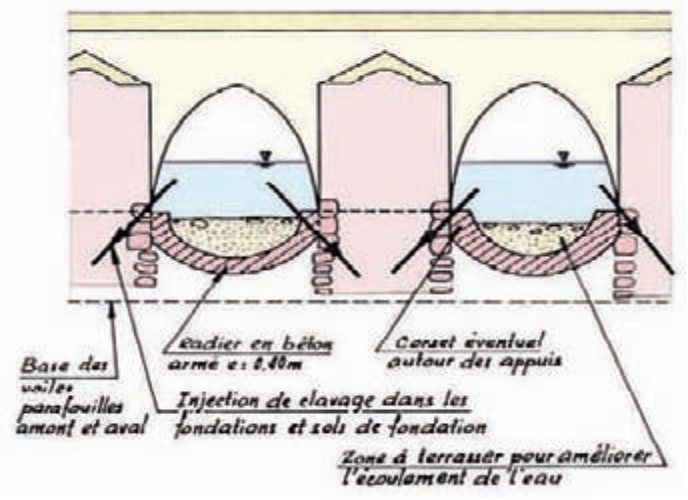

Base des voiles parafouilles amont et aval
radier en béton armé e : 0,80m
Corset éventuel autour des appuis
Injection de clavage dans les fondations et sols de fondation
Zone à terrasser pour améliorer l'écoulement de l'eau

*Figure n° 16 : projet de radier général en forme de voûte inversée avec petit corsetage des appuis pour renforcer la structure*

### 2.9.5.2 Avantages du radier en béton armé

Les fonds rocheux, tels que les schistes, les marnes, les molasses, le calcaire..., sont lentement érodables. Les fondations des appuis sont très peu encastrées dans ces matériaux, ce qui permet le développement de cavités qui sont difficilement décelables, car elles sont comblées par des dépôts meubles en période d'étiage.

Dans de tels sites, il est difficile, sinon illusoire, de foncer des palplanches et de protéger le pied du voile vis-à-vis de la poursuite de l'érosion du lit.

Le radier général en béton armé avec parafouille amont et aval est souvent la solution. Cette protection est applicable à d'autres fonds que rocheux. Elle est très utilisée si les sols sont meubles. Elle présente l'avantage d'assurer un meilleur écoulement de l'eau, car la rugosité est plus faible que le sol ou le tapis d'enrochement de protection du lit. Le radier présente l'avantage d'une épaisseur de béton moindre que celle à donner aux enrochements en tapis. Le radier peut servir à bloquer le pied d'un rideau métallique destiné à protéger la base de l'appui.

Le radier présente également la particularité de s'adapter aisément aux conditions de fondation des différents appuis en prenant des géométries et des altitudes transversales répondant aux contraintes de stabilité à assurer aux fondations.

## 2.9.6 UNE VARIANTE, LE RADIER GÉNÉRAL EN ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS

**> Une technique de tapissage des fonds en éléments préfabriqués constitue une variante au radier général coulé en place en béton armé :**

- sa réalisation fait appel à des blocs de béton préfabriqués montés en tresses sur des câbles en acier inoxydable du commerce ;
- les dimensions standard des ensembles préfabriqués sont de 6,00 m x 1,20 m et de 6,00 m x 2,40 m pour des épaisseurs de 8 à 15 cm. Les blocs unitaires ont des dimensions de 0,34 x 0,30 m ou 0,34 x 0,40 m et sont évidés ou pleins. Les faces latérales des blocs sont profilées de biais pour obtenir une flexibilité dans tous les sens ;
- en face inférieure, les éléments portent un filtre géotextile qui remplit le rôle de système de filtration granulaire. Un exemple de protection au pourtour d'un appui est donné par la photo n° 13 et la figure n° 17 ci-dessous ;
- la pose des éléments nécessite une préparation des sols pour constituer une assise régulière et profilée. Comme pour tout radier, les extrémités doivent être protégées par un système parafouille. Le béton des blocs doit être compact, dense et réalisé avec un maximum de ciment pour éviter ou limiter son érosion.

***Photo n°13 : élément préfabriqué pour radier préfabriqué*** *(crédit photo JP. Levillain)*

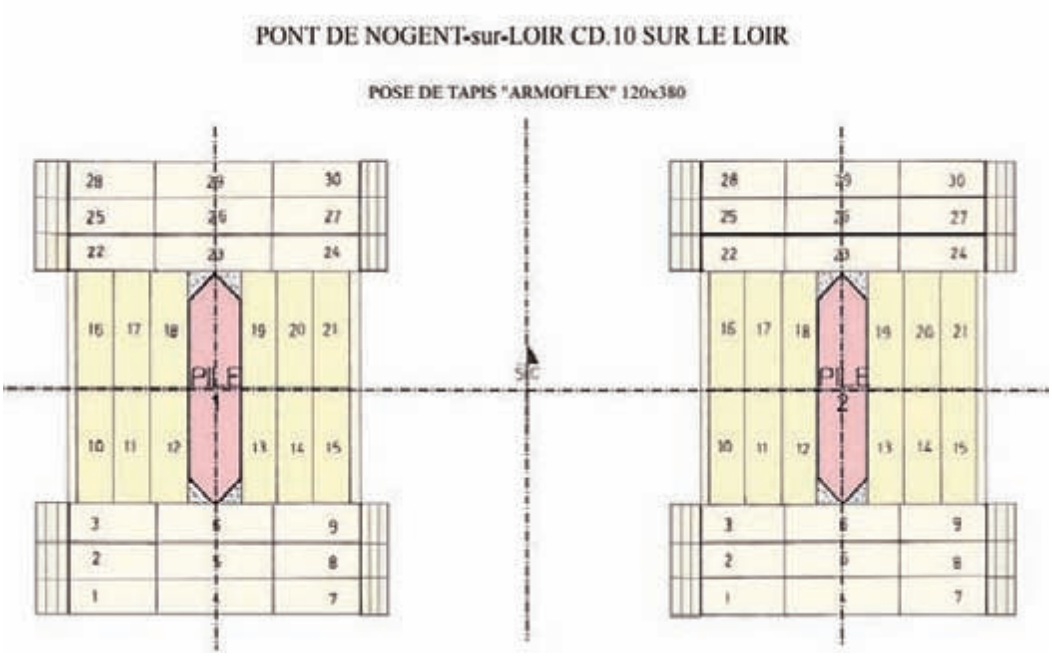



***Figure n°17 : exemple de la protection des sols au pourtour d'un appui par des éléments de blocs préfabriqués***

## 2.10.1 PRINCIPALES UTILISATIONS DES PALPLANCHES

**Les palplanches métalliques et certains profils dérivés** sont fréquemment utilisés, à titre provisoire ou définitif, pour le confortement ou la protection des fondations.

**> Parmi les diverses fonctions que peuvent assurer ces profils, on peut relever celles :**

- de coffrage ;
- de protection des sols de fondations contre l'affouillement (parafouilles verticaux) ;
- d'enceinte étanche, par exemple pour la réalisation de rideaux d'encagement destinés à limiter la zone de sol à traiter par injection ;
- de batardeau, provisoire pour la mise à sec avant travaux d'un appui ou d'un ensemble d'appuis, ou le plus souvent intégré au dispositif de protection de la fondation ;
- d'élément porteur, à titre provisoire ou définitif, par des caissons de palplanches soudées, mais dont l'emploi est assez exceptionnel dans le cadre des travaux confortatifs.

## 2.10.2 UTILISATION DES PALPLANCHES EN COFFRAGE

Utilisées en coffrage, les palplanches doivent être justifiées en géométrie par la fiche à leur donner pour assurer leur stabilité et par la poussée du béton frais introduit entre les rideaux de coffrage et l'appui. Il faut s'assurer que les profils peuvent reprendre les efforts de flexion et que le maintien des rideaux est suffisant.

Le concepteur doit étudier la tenue du coffrage en partie haute en phase provisoire et en phase définitive et il doit étudier la tenue en partie basse selon la nature des terrains.

En général, les coffrages ou les palplanches fichées dans les sols pour assurer la butée et l'étanchéité sont laissés en place et protègent, dans une certaine mesure, les matériaux. L'arrachage des palplanches est une opération qui désorganise le sol autour de l'appui et crée une zone sensible à l'action érosive de l'eau.

Les profilés doivent être solidaires au béton et au mortier coulé en place, à l'aide de connecteurs soudés et convenablement répartis.

## 2.10.3 RIDEAUX DE PROTECTION DES SOLS DE FONDATION CONTRE L'AFFOUILLEMENT

Dans cet objectif, les palplanches sont conçues pour servir de coffrage de comblement d'éventuelles cavités et de parafouille pour éviter la formation de celles-ci dans les sols et les massifs. Il faut que les palplanches soient foncées dans les terrains en place sur une hauteur suffisante pour que leur pied soit à l'abri des affouillements (photo n° 14).

***Photo n° 14 : exemple de protection des sols au pourtour des appuis par un rideau de palplanches*** *(crédit photo JP. Levillain)*

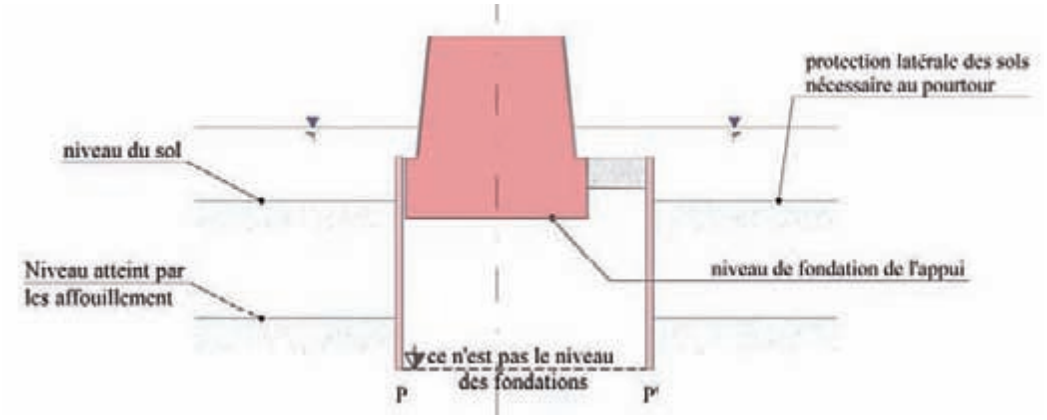



*Figure n° 18 : la fiche des palplanches n'augmente pas la profondeur du niveau de fondation*

***ATTENTION :*** *des palplanches fichées en profondeur ne modifient pas pour autant le niveau de fondation de l'appui. La résistance mécanique du sol n'est pas améliorée et* ***la sécurité n'est pas modifiée par rapport à l'état antérieur (figure n° 18)****.*

Une telle solution d'encagement nécessite de réaliser une protection périphérique des sols au pourtour de l'encagement pour empêcher la déformation latérale de palplanches sous la poussée des terres chargées par la fondation et de donner de la butée latérale tout en évitant les affouillements du lit.

## 2.10.4 ENCEINTE ÉTANCHE POUR LE TRAITEMENT D'UN MASSIF DE SOLS PAR INJECTION

Lorsque les terrains meubles en place sous la maçonnerie de l'appui présentent des caractéristiques suffisamment médiocres pour que l'on soit conduit à les traiter par injection sur quelques mètres de profondeur, les enceintes en palplanches permettent alors de délimiter latéralement de manière efficace le sol sur la hauteur à traiter par injection.

Les efforts créés par l'injection sont faibles pour ne pas déterminer le choix des caractéristiques des profils. Ce choix résulte des efforts susceptibles de se développer dans les palplanches en cas d'affouillement maximal et lors de la mise en œuvre en présence d'obstacles durs enfouis.

## 2.10.5 BATARDEAUX POUR MISE À SEC DES APPUIS

Les palplanches métalliques sont très utilisées pour la réalisation de batardeaux permettant l'exécution de travaux à sec.

La solution courante est constituée de rideaux de palplanches de module élevé, maintenus par un ou, plus rarement, plusieurs niveaux d'étaiement horizontaux mis en place autour et à proximité de l'appui, à l'extérieur des protections en bois éventuelles. Le batardeau est généralement aussi conçu pour assurer à titre provisoire d'autres fonctions (cf. les paragraphes précédents) et une protection de la fondation et des terrains sous-jacents contre l'action de l'eau à titre définitif (photo n° 15).

***Photo n° 15 : batardeau de mise à sec des appuis*** *(crédit phot JP. Levillain)*

Ce type de batardeau diffère des enceintes en palplanches précédemment décrites par les dispositifs d'étaiement devant assurer la stabilité des rideaux lors de la mise à sec de la fouille et par les profils utilisés, de plus fort module pour résister aux efforts induits par le maintien d'une dénivelée d'eau.

Un soin particulier doit être porté à la conception et à la réalisation des dispositifs d'étaiement, qui, en cas de défaillance durant les travaux, peuvent entraîner la destruction brutale du batardeau, de graves désordres dans la fondation et, par voie de conséquence, dans l'ouvrage. En particulier, lorsque des butons prennent appui sur les maçonneries, il convient de s'assurer que celles-ci sont en mesure de reprendre ces efforts et d'éviter tout chargement dissymétrique. Quelle que soit la hauteur d'eau retenue, il y a lieu de prévoir un niveau d'étaiement supérieur, qui souvent sera le seul, compte tenu des difficultés de mise en œuvre de niveaux inférieurs de par la présence de la fondation.

L'un des risques les plus graves encourus durant la mise à sec de la fouille est celui de **renard hydraulique** qui, s'il se produit, peut entraîner très rapidement l'effondrement d'une fondation en état de stabilité précaire. Il y a lieu d'être extrêmement prudent et même d'éviter la mise à sec lorsque l'appui est fondé superficiellement ou sur pieux flottants en terrain pulvérulent et que le pied des palplanches ne peut être suffisamment "fiché" dans des terrains peu perméables et consistants. Ce phénomène peut se produire même si une seule ou quelques palplanches n'ont pas atteint leur cote de projet, ce qui peut être le cas dans des terrains contenant des enrochements ou des obstacles durs divers.

Les palplanches utilisées pour la réalisation de tels batardeaux étant souvent à la fois de fort module et d'assez grande longueur, les difficultés de mise en œuvre sont accentuées, d'autant que l'on cherche généralement à réaliser le batardeau le plus près possible de la fondation pour limiter la réduction du débouché et les affouillements du batardeau.

L'importance des problèmes soulevés ci-dessus dépend directement de la dénivelée d'eau que l'on cherche à maintenir de part et d'autre du batardeau. Lorsque la dénivelée excède deux à trois mètres, les problèmes sont difficiles à résoudre. Dans les cas où la stabilité de l'appui est précaire, notamment en présence de cavités, il est nécessaire de prévoir un confortement préalable des fondations avant d'envisager la mise à sec.

## 2.10.6 PARTICULARITÉS DE LA MISE EN ŒUVRE DES PALPLANCHES

### 2.10.6.1 Généralités

**> Ce paragraphe ne traite que des problèmes particuliers que pose la mise en œuvre de palplanches autour de fondations d'ouvrages anciens en site aquatique, et dus notamment :**

- à la présence dans le sol d'enrochements et d'obstacles divers (anciennes maçonneries, pieux en bois, ...) qui nécessitent une extraction préalable ;
- à l'environnement et plus particulièrement à la géométrie de l'ouvrage qui limite la hauteur libre (passage sous les voûtes par exemple).

### 2.10.6.2 Choix d'une technique de fonçage

Parmi les **quatre techniques de fonçage des palplanches** actuellement employées que sont **le battage, le vibrage, le vérinage et le lançage,** celles qui paraissent les moins susceptibles de désorganiser les terrains autour des fondations, d'engendrer des vibrations ou des tassements sont le vérinage puis le battage.

**Le lançage est une technique à proscrire à proximité immédiate de fondations en état d'équilibre précaire,** à cause du remaniement important du sol de fondation que son emploi provoque.

**Le vibrage** est une technique qui, du seul point de vue du fonçage des palplanches, peut souvent convenir dans les alluvions sablo-graveleuses. Mais son emploi peut provoquer un effondrement de la structure du sol et des tassements autour et sous la fondation, surtout lorsque le sol est constitué de sables lâches saturés, ou encore transmettre à la fondation et à l'ouvrage des vibrations excessives susceptibles de désorganiser les maçonneries et d'entraîner de graves désordres. **L'utilisation du vibrage à proximité des fondations d'ouvrages anciens est donc à déconseiller.**

**Le vérinage** est la technique de fonçage des palplanches qui conviendrait le mieux pour la sécurité de l'ouvrage. Son emploi est cependant restreint pour deux raisons essentielles : elle ne peut convenir que dans des terrains peu consistants ne contenant pas d'obstacles durs et il semble qu'il n'y ait en France, à ce jour, que peu d'entreprises disposant des engins nécessaires à sa mise en œuvre.

Pour ces diverses raisons, **le battage** est la technique la plus employée actuellement. Si son utilisation peut parfois présenter quelques risques pour la stabilité de la fondation, ces risques sont moindres que ceux inhérents à l'emploi des autres techniques de fonçage et peuvent être encore diminués par un choix adéquat des engins de battage. En tout état de cause, pour les appuis dont la stabilité est précaire, le battage doit être précédé du comblement des cavités existantes.

Les principaux engins de battage utilisés sont les moutons à chute libre, les moutons à simple effet, les moutons à double effet ou marteaux trépideurs et les moutons diesel. Les moutons à chute libre, compte tenu de leur souplesse d'utilisation, paraissent bien adaptés à la fois pour la mise en œuvre des palplanches et pour la sécurité de l'ouvrage, mais leur emploi est actuellement peu répandu. Les marteaux trépideurs et les moutons diesel sont pratiquement les seuls engins utilisés couramment par les entreprises spécialisées.

Le choix des caractéristiques des engins à utiliser dépend des caractéristiques des terrains à traverser, de la profondeur à atteindre et du poids du profil à foncer. Il faut limiter l'énergie mise en jeu à celle strictement nécessaire pour le fonçage pour limiter les risques de transmettre à l'ouvrage des vibrations dangereuses et en fonçant au besoin les palplanches une à une, ce qui permet de diminuer la masse frappante nécessaire. En pratique, on adopte des engins dont le poids de la masse frappante est de l'ordre de 0,7 à 1,5 fois le poids du profil à battre pour les moutons à chute libre et les moutons à simple effet et 0,5 à 0,8 fois le poids du profil pour les moutons diesel. Pour les marteaux trépideurs, une règle pratique propose que le poids du piston de l'engin à utiliser ne soit pas inférieur au cinquième du poids du profil à foncer.

Pour la première phase de fonçage, parce qu'il n'est pas souhaitable d'utiliser des engins trop puissants alors que les palplanches ne sont pratiquement pas fichées dans le sol, qu'il est en général assez facile de traverser les terrains superficiels et que le gabarit disponible sous l'ouvrage est très souvent fort réduit, on utilise généralement des petits engins de battage de faible encombrement comme des petits marteaux trépideurs. Il faut s'assurer que les palplanches ne seront pas soumises lors du battage à des efforts parasites susceptibles de les dégrader ou de les faire dévier de leur position théorique. Cela peut notamment se produire lorsque l'axe de frappe de l'engin est dévié par rapport à l'axe de la palplanche à battre.

### 2.10.6.3 Travaux préalables d'extraction ou de destruction des obstacles

La présence d'enrochements ou d'obstacles, tels d'anciennes maçonneries ou de pieux en bois de construction, nécessite généralement leur extraction préalable s'ils sont enfouis dans les alluvions de surface (maximum 2 m). Ces travaux, consistant à réaliser une souille près de la fondation, doivent être menés avec le plus grand soin pour éviter toute décompression ou tout éboulement du sol sous l'appui. En particulier, ils doivent être effectués en eaux calmes et à l'aide de petits engins. La souille doit être exécutée sur une longueur limitée (de l'ordre de 2 m) et l'enlèvement des obstacles doit être immédiatement suivi du remblaiement de la souille puis du fonçage au moins partiel des palplanches.

Lorsque des obstacles durs isolés sont rencontrés à plus grande profondeur en cours de battage, il faut poursuivre la mise en œuvre et le fonçage des autres palplanches des rideaux, sans chercher à "passer" ces obstacles au fur et à mesure de leur rencontre. Cela permet, d'une part, de mieux connaître leur importance (suivant le nombre de palplanches voisines prématurément arrêtées) et, d'autre part, de les "passer" plus facilement par la suite quand ils sont peu importants, en bénéficiant de l'autoguidage des palplanches entre elles. On peut espérer passer de cette façon des blocs isolés atteignant jusqu'à cinquante centimètres environ, c'est-à-dire lorsqu'ils concernent une ou deux palplanches, ou plus, lorsque l'on est sûr toutefois d'être en présence de plusieurs blocs rocheux de faible importance et non d'un seul gros bloc. Dans le cas contraire, l'extraction de l'obstacle, s'il n'est pas trop profond, ou sa désorganisation par de multiples forages **(attention aux engins explosifs de guerre non désamorcés)** sont les seuls moyens permettant de poursuivre le fonçage. La dislocation par explosif est bien évidemment à proscrire ici. Dans de tels terrains, le choix du module des palplanches et de la nuance de l'acier sont souvent tributaires plus de la mise en œuvre que des efforts de flexion qui les solliciteront.

### 2.10.6.4 Conduite du fonçage

Le fonçage des palplanches par panneaux est le procédé le mieux adapté sitôt que celles-ci doivent être assez profondément battues dans des terrains hétérogènes ou contenant des obstacles. Il permet, en effet, grâce à l'autoguidage des palplanches entre elles, de limiter les risques de déversement, déviation et dégrafage et les pertes d'énergie de battage, d'autant plus gênantes que l'on cherche à employer des engins de faible puissance. Par ailleurs, ce procédé permet de passer, dans les meilleures conditions, les obstacles durs isolés qui n'ont pas pu être extraits du sol.

### 2.10.6.5 Enclenchement et fonçage des palplanches sous gabarit réduit

La mise en œuvre des palplanches sous gabarit réduit et, plus particulièrement, le début du battage sous les voûtes des ponts en maçonnerie, posent des problèmes délicats qui conduisent à augmenter parfois considérablement le nombre de phases élémentaires

d'exécution. Les méthodes alors envisageables sont **l'éclissage, le ripage** des palplanches avec éventuellement **le creusement d'une souille, le découpage des joints** de la partie supérieure des palplanches et, bien entendu, le choix d'engins de battage de faible encombrement.

### 2.10.6.5.1 Éclissage des palplanches

Lorsque la hauteur libre sous l'ouvrage est inférieure à la longueur totale des palplanches, une solution consiste à utiliser des profils courts assemblés bout à bout. La liaison par simple soudure est insuffisante ; elle doit être complétée par un renforcement au moins sur l'âme : **l'éclissage.** Cette solution, malgré son coût, les difficultés et les aléas qu'elle présente (risque de fragilisation de la section entée des palplanches consécutif à une mauvaise exécution), reste dans de nombreux cas la seule possible. Il faut prendre soin de ne pas disposer toutes les entures au même niveau dans les rideaux terminés : une différence de niveau d'un mètre entre palplanches ou paire de palplanches paraît être un minimum à respecter (figure n° 19).

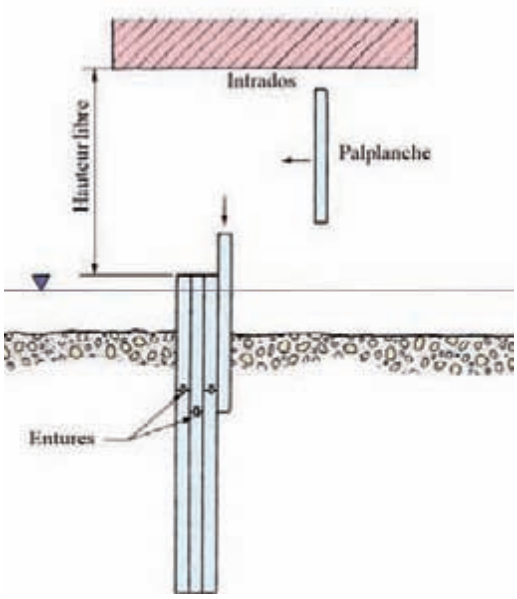



***Figure n° 19 : principe d'éclissage des palplanches***

### 2.10.6.5.2 Ripage des palplanches

Lorsque la hauteur libre sous l'ouvrage ne permet pas l'enclenchement des palplanches, tout en étant suffisante pour permettre le fonçage, une solution est d'enclencher les palplanches à l'extérieur de la zone à gabarit réduit puis à riper celles-ci sous l'ouvrage (figure n° 20). Dans l'axe du rideau à construire, on suspend, horizontalement, à l'ouvrage existant, deux profilés rigides parallèles et dépassant des deux côtés. L'intervalle entre les profilés doit être légèrement supérieur à l'ondulation du rideau. Chaque palplanche est percée à sa partie supérieure d'un trou (trou de manutention existant par exemple) dans lequel on enfile une broche. La première palplanche est descendue entre les profilés, bloquée par la broche, puis

légèrement ripée sous l'ouvrage pour permettre l'enclenchement de la deuxième. Les opérations sont répétées jusqu'à assemblage de l'ensemble du rideau. On descend ensuite légèrement les profilés qui serviront de guide pour battre les palplanches. Il reste après à foncer ce panneau.

Lorsque la hauteur totale sous l'ouvrage est insuffisante pour que l'on puisse battre les palplanches, même avec un engin de faible encombrement, on peut creuser dans l'axe du futur rideau une rigole ou une petite souille en s'assurant toutefois de ne pas mettre en jeu la stabilité de la fondation.

Le ripage des palplanches suppose que l'on puisse suspendre à l'ouvrage des profilés, ce qui n'est pas toujours aisé, et que l'ouvrage puisse supporter la charge apportée par le panneau suspendu. D'autres solutions peuvent être conçues dans le cas contraire comme, par exemple, des appuis extérieurs rapportés pour les profilés (figure n° 20).

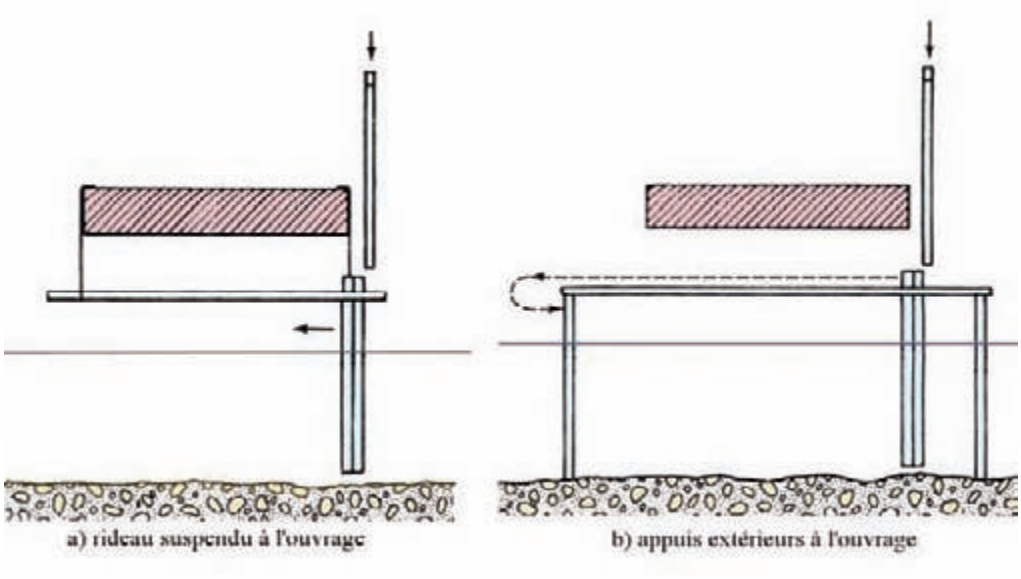



***Figure n° 20 : principe de ripage des palplanches***

### 2.10.6.5.3 Découpage des joints des palplanches

Lorsque la hauteur libre sous l'ouvrage ne permet pas l'enclenchement des palplanches mais que la hauteur totale sous l'ouvrage est supérieure à la longueur de celles-ci, il est possible d'enclencher des palplanches sous l'ouvrage en découpant préalablement les joints à leur partie supérieure (se reporter à la figure ci-après). Cette opération est coûteuse, délicate à réaliser, ne peut être effectuée que par des spécialistes et uniquement si la partie supérieure des palplanches, dont la résistance est assez fortement diminuée, peut résister aux efforts qui la solliciteront, tant à la mise en œuvre qu'après. Lorsque la partie supérieure des rideaux sert de coffrage perdu lors du bétonnage de l'enceinte, il faut une étanchéité satisfaisante pour la partie sans joint et prévoir une bonne solidarisation de celle-ci au béton.

Le découpage des joints ne peut être effectué de toute façon que sur une longueur limitée et, en tout état de cause, doit être exclu si le sol à l'intérieur de l'enceinte en palplanches est susceptible d'être entraîné par les ouvertures que l'on a ainsi créées.

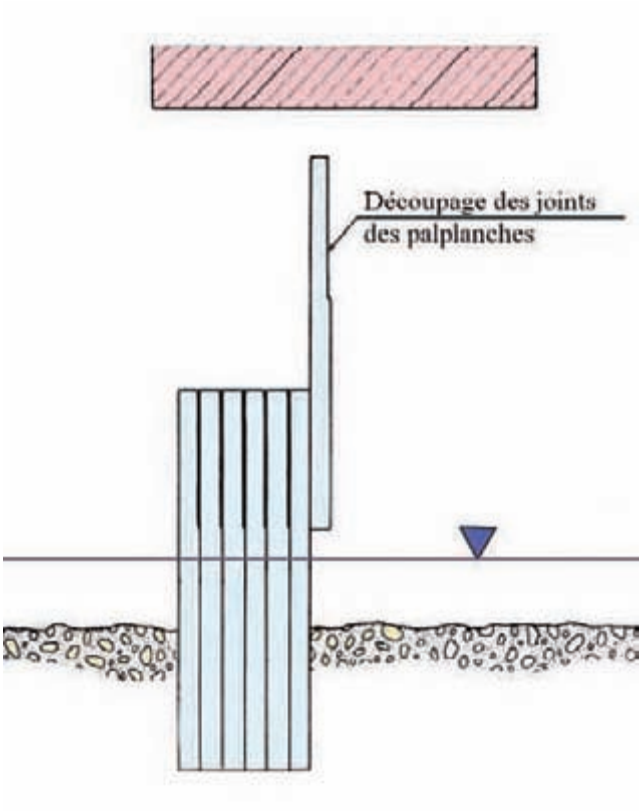



***Figure n° 21 : découpage des joints***

**> Quels que soient la nature des fondations et le type de confortement envisagé, tout travail de réparation doit être précédé des opérations préparatoires suivantes :**

- le relevé des fonds du lit aux abords de l'ouvrage ;
- la mise en place d'un dispositif de suivi du comportement de l'ouvrage et plus particulièrement de l'appui traité (nivellement, témoins, enregistrement des vibrations, etc.).

**> Et, suivant l'état de l'ouvrage :**

- du renforcement provisoire ou définitif de l'appui (fût de pile, mur de culée) par ceinturage ou étaiement ; ce renforcement provisoire a pour objet de limiter les risques de dislocation de l'appui lors de phases délicates, telles que terrassements, fonçage des palplanches, etc.;
- de l'aménagement du lit et des abords, de la déviation du cours d'eau, de la mise à sec ;
- de la protection des appuis voisins contre l'action des eaux résultant des travaux, ces travaux pouvant être exécutés dans le cadre de la réalisation d'accès à l'appui à conforter.

**> Ensuite sont effectués :**

- les terrassements préparatoires destinés à éliminer les éléments gênants (arbres, palplanches en bois déversées, enrochements) dont la suppression ne compromet pas la tenue de l'ouvrage ; ces terrassements doivent être conduits avec prudence, si nécessaire par tranches, chaque phase étant immédiatement suivie par la mise en place d'éléments stabilisateurs ou par un remblaiement ;
- le nettoyage de la fondation à réparer ; ce nettoyage peut être réduit ou, à la limite, supprimé s'il risque de fragiliser la fondation.

**> A l'issue de ces opérations préliminaires, viennent les travaux de confortement proprement dits. Dans le cas d'une fondation sur pieux en bois, confortée par un encagement, la succession normale des phases est la suivante :**

- pose, éventuelle, d'éléments stabilisateurs du lit à la périphérie de la fondation (enrochements, sacs de sable) ;
- mise en place des dispositifs de guidage des palplanches (deux niveaux distincts, un à la rigueur dans certains cas limites) supportés par des appuis indépendants de l'ouvrage (exemple : palpieux fichés dans le sol…) ;
- mise en fiche de l'ensemble de l'encagement, dans l'ordre suivant :

  - avant-bec (deux panneaux à 90° environ),
  - rideaux latéraux (parallèles à la direction principale des fils d'eau),
  - arrière-bec (deux panneaux à 90° environ).

- mise en fiche, qui peut être précédée d'un terrassement complémentaire par tranches (souille dans laquelle les palplanches sont placées), suivi immédiatement de la mise en place d'éléments stabilisateurs du lit et d'épaulement des rideaux ;
- fonçage des palplanches sous surveillance renforcée de l'ouvrage ;
- exécution du raidissage et de l'étaiement de l'encagement ;
- terrassement à l'intérieur de l'encagement, dans l'espace annulaire entre les rideaux et la fondation à conforter ;
- nettoyage de la fondation et du rideau (lavage à l'eau ou soufflage à l'air comprimé) ;
- réfection des parties altérées accessibles de la fondation ancienne (têtes de pieux, grillage en bois, etc.) : cette opération peut nécessiter un léger abaissement du niveau de l'eau à l'intérieur de l'enceinte en palplanches. Il faut s'assurer que cet abaissement n'engendrera pas de risque pour la fondation et le fond de fouille ;
- comblement éventuel d'une partie de l'espace annulaire par un matériau destiné à limiter les quantités de béton à mettre en œuvre ; ce matériau doit être disposé de façon régulière, symétrique et sans excès ;
- soudage sur les palplanches des connecteurs destinés à relier l'encagement au béton coulé dans l'espace annulaire ;
- mise en place d'armatures destinées à assurer la liaison entre la fondation ancienne et les éléments rapportés (béton, palplanches) ;
- mise en place, dans le fond des lacunes encore présentes sous le platelage, de «cannes» permettant le clavage de la fondation et de l'appui par injection ;
- fixation dans l'espace annulaire de tubes et viroles permettant des interventions ultérieures de contrôle, d'injection ;
- gainage éventuel de certains pieux ;
- bétonnage de l'espace annulaire en deux phases :
  - mise en place d'un béton immergé (sur une hauteur de 0,80 m minimum),
  - après mise en place du ferraillage, bétonnage à sec de la partie supérieure ;
- clavage par injection suivi d'un recépage des tubes de réservation ;
- ferraillage et bétonnage de la dalle de couverture ;
- injection éventuelle du sol encagé ;
- recépage des palplanches ;
- mise en place d'un couronnement des rideaux protégeant la coque des chocs de bateaux dans le cas des cours d'eau navigables ;
- dépose du ceinturage provisoire et de l'étaiement de l'appui ;
- reprofilage des fonds du cours d'eau.

## 2.12.1 PRINCIPES ET OBJECTIFS DES ENCAGEMENTS

L'encagement au pourtour d'un appui consiste à réaliser un écran étanche évitant les circulations d'eau au sein des matériaux constitutifs de la fondation (massif de béton de chaux) et sous les fondations superficielles. Ils peuvent également être envisagés pour se substituer aux rideaux de vannage en bois ayant servi de coffrage au béton de chaux enserrant les pieux pour assurer leur protection.

## 2.12.2 DESCRIPTION DES ENCAGEMENTS ET PRÉCAUTIONS À ENVISAGER

Pour remédier à l'existence de cavités sous un appui ou à une dégradation profonde des maçonneries, la solution fréquemment avancée est la mise en place d'un voile vertical en béton ou d'un rideau de palplanches légères avec comblement de l'espace annulaire par un béton immergé. Il s'agit là d'une **mesure de protection** qui, si elle arrête le processus de dégradation du liant, **ne modifie pas cependant les mécanismes d'érosion hydrauliques en jeu.** Bien souvent même, cette protection les amplifie. Le choix d'un tel procédé confortatif ne saurait être fait qu'en ayant au préalable apprécié l'évolution probable de l'érosion du lit et jugé, en conséquence, de la stabilité de l'appui et des protections envisagées. La méconnaissance de ces éléments a souvent conduit à d'importants déboires, à cause de l'impression de sécurité entretenue par l'aspect rassurant de ces "protections" de forme massive, que leur mauvaise conception et leur inadaptation réduisaient, en fait, à un rôle de **"cache-misère"** (photo n° 16).

***Photo n° 16 : élargissement de la base d'un appui par un voile en béton. Bien souvent, un "cache-misère" donnant l'illusion de la sécurité*** *(crédit photo JP. Levillain)*

L'examen de nombreux projets révèle de graves erreurs de conception. En premier lieu, ces rideaux ou voiles coffrés en béton présentent souvent une fiche insuffisante sous le niveau moyen des fonds. Très souvent, le coffrage ou le pied des palplanches repose directement sur les blocs de protection ou les alluvions, le pourtour de l'appui n'ayant été que légèrement dégagé. Le confortement devient alors très vite caduc si l'approfondissement du lit se poursuit. De nouvelles cavités se forment sous le voile accroché à l'appui et progressent sous les fondations que l'on voulait protéger. Par ailleurs, la largeur donnée à cette enceinte de protection est trop souvent exagérée. Le débouché superficiel est dangereusement réduit et provoque une augmentation importante des vitesses locales d'écoulement. Cette surlargeur résulte généralement du maintien en place des pieux extérieurs et des enceintes en bois subsistantes, voire des enrochements, par crainte, non justifiée par des investigations, de fragiliser temporairement la fondation en les supprimant.

D'autres insuffisances sont le résultat de la recherche d'économies s'avérant illusoires après quelques années. Ainsi, l'ancrage du rideau en tête ne doit pas être assuré par un scellement de quelques barres dans une seule pierre de parement, mais sur une longueur suffisante pour intéresser un volume important de maçonnerie. Avec des piles minces, une solution efficace est de relier les rideaux en vis-à-vis par des ancrages traversant l'appui, ou mieux, sans mettre en œuvre de tirant, de relier les rideaux verticaux par la dalle de couronnement en béton armé jouant le rôle d'une poutre horizontale.

On relève souvent une insuffisance de ferraillage de l'espace annulaire bétonné et de la dalle de couverture. La fissuration inévitable, qui se développe rapidement, favorise alors la dégradation par l'eau de ces parties qui viennent d'être réparées.

**La figure ci-après résume les observations précédentes ; de plus, elle porte, en regard, les dispositions à préférer.**

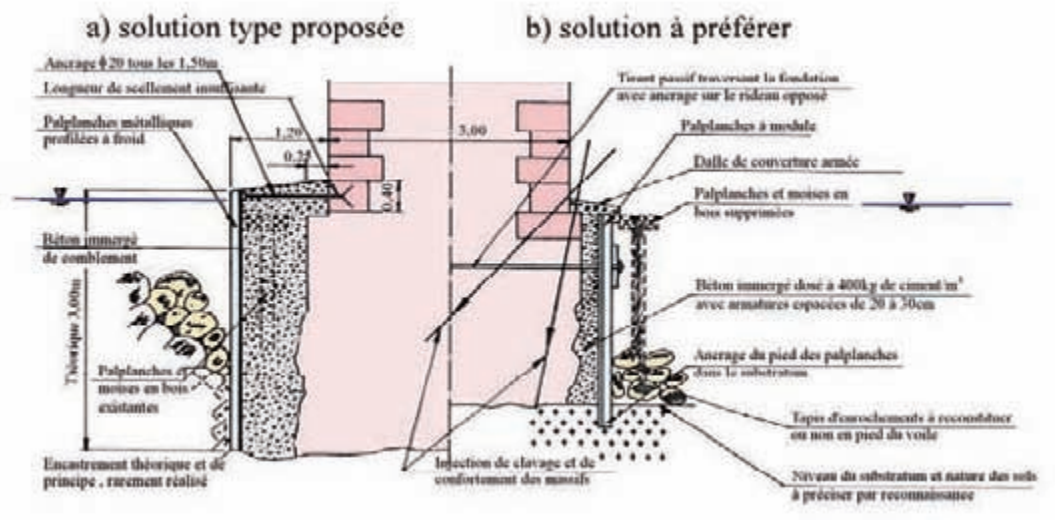

a) solution type proposée
b) solution à préférer
Ancrage ϕ 20 tous les 1,50m
Longueur de scellement insuffisante
Palplanches métalliques profilées à froid
1,20
0,25
0,40
3,00
Béton immergé de comblement
Théorique 3,00m
Palplanches et moises en bois existantes
Encastrement théorique et de principe, rarement réalisé
Tirant passif traversant la fondation avec ancrage sur le rideau opposé
Palplanches à module
Dalle de couverture armée
Palplanches et moises en bois supprimées
Béton immergé dosé à 400kg de ciment/m³ avec armatures espacées de 20 à 30cm
Ancrage du pied des palplanches dans le substratum
Tapis d'enrochements à reconstituer ou non en pied du voile
Injection de clavage et de confortement des massifs
Niveau du substratum et nature des sols à préciser par reconnaissance

***Figure n° 22 : le voile vertical en béton ou le rideau de palplanches, une solution souvent proposée pour réparer les fondations, mais qui doit être améliorée***

## 2.12.3 CONFORTEMENT DES MASSIFS DE FONDATION EN BÉTON DE CHAUX

Cette technique de fondation sur massif de béton de chaux hydraulique a été très souvent employée au XIXe siècle, notamment pour les petits ouvrages, en raison de son intérêt économique, car elle évitait les épuisements. Un siècle et demi plus tard, on constate de fréquents désordres.

L'altération des palplanches en bois ou des rideaux de vannage, voire leur destruction par abrasion, mettent ces massifs directement au contact de l'eau. Celle-ci, constamment renouvelée, se charge en chaux, conduisant à une désagrégation progressive du massif. L'emploi d'une chaux de médiocre qualité, une mauvaise mise en œuvre en emprisonnant la laitance, donnent des massifs fragmentés et, par suite, très vulnérables à une réduction de leur encastrement.

Le terrassement des sols de fondation sous eau et la mise en œuvre du béton de chaux hydraulique sous eau dans le coffrage constitué par le vannage conduisait à des géométries courbes du fond de fouille et du niveau d'assise du massif.

Si les désordres se limitent à une simple attaque de la périphérie, il importe de reconstituer une enceinte fermée pour empêcher l'action de l'eau, tout en garantissant l'encastrement de la fondation.

Par contre, si le massif est vicié dans sa masse, avant de procéder à sa régénération par un coulis de ciment, il est nécessaire de dresser un bilan global de l'état de l'ouvrage. En effet, la régénération par injection destinée à restituer au massif son monolithisme nécessite, d'une part, un maillage de perforation très resserré et, d'autre part, la réfection d'une enceinte de protection qui doit être alors un corset en béton armé ou en palplanches (photo n° 17 et figure n° 23).

***Photo n° 17 : coffrage d'un corset en béton armé*** *(crédit photo JP. Levillain)*

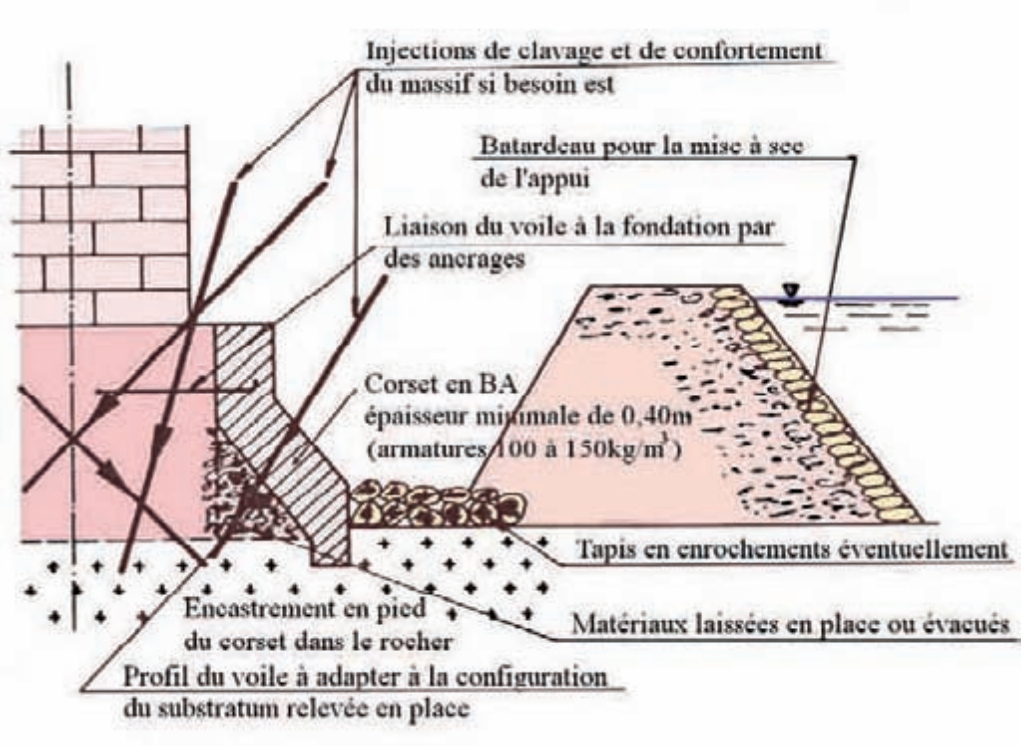

Injections de clavage et de confortement
du massif si besoin est
Batardeau pour la mise à sec
de l'appui
Liaison du voile à la fondation par
des ancrages
Corset en BA
épaisseur minimale de 0,40m
(armatures 100 à 150kg/m³)
Tapis en enrochements éventuellement
Encastrement en pied
du corset dans le rocher
Matériaux laissées en place ou évacués
Profil du voile à adapter à la configuration
du substratum relevée en place

***Figure n° 23 : exemple d'un massif de béton de chaux désorganisé conforté par un corset en béton armé et une injection de régénération du liant***

## 2.13.1 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

La technique de traitement des sols et des massifs de fondation par une injection sous forme d'incorporation d'un liant a pour objet d'améliorer les propriétés mécaniques des matériaux traités, sans agression sous forme de déplacement de serrage.

L'injection est réalisée sur un ouvrage existant exerçant des charges sur le sol dont il convient de ne pas provoquer la déstabilisation par les différentes phases des travaux.

**Le guide STRRES FAFO 1 Réparation et renforcement des fondations,** présente les différentes méthodes d'amélioration ou de renforcement des sols de fondation par injection.

**> Il faut également se reporter aux documents suivants :**

- norme **NF P95-106 :** Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Spécifications relatives aux fondations ;
- norme **NF EN 12-17 :** Exécution de travaux géotechniques spéciaux : injection ;
- publication de l'**AFTES :** Recommandations : la conception et la réalisation de travaux d'injection des sols et des roches, datées de mai/juin 2006, parues dans les numéros 194-195 relatifs aux tunnels et ouvrages souterrains ;
- confortement par injection des fondations d'ouvrages d'art. Rapport du laboratoire série géotechnique mécanique des sols sciences de la terre GT4.

## 2.13.2 OBJECTIFS DES TRAVAUX D'INJECTION

**> Les objectifs des travaux d'injection sont les suivants :**

- **Injection de protection ou d'étanchement :**

L'injection de protection consiste essentiellement en la confection d'un rideau d'encagement permettant de délimiter convenablement le volume du traitement. Par contre, une injection d'étanchement correspond à l'exécution d'un écran contre les circulations d'eau.

- **Injection de remplissage ou de bourrage :**

L'injection de remplissage concerne le comblement de cavités ou de vides importants mettant en péril une fondation. Cela impose donc au préalable la réalisation d'un coffrage pouvant contenir les matériaux d'injection mis en œuvre gravitairement ou sous une très faible pression.

Quant à l'injection de bourrage, elle correspond à un remplissage d'un milieu bien délimité à pression parfaitement définie.

■ **Injection de collage, de serrage, de compactage ou de clavage :**

Une telle injection a pour but d'améliorer les caractéristiques mécaniques de contact (collage) ou de volume d'un matériau donné en recherchant à densifier le matériau ou à combler de petits vides subsistant après certaines phases de travaux.

■ **Injection de consolidation ou de renforcement :**

Ce type d'injection consiste à augmenter les caractéristiques mécaniques d'un matériau en remplissant les vides intergranulaires par imprégnation ou par intrusion d'un coulis approprié.

■ **Injection de scellement :**

Cette injection correspond à une solidarisation soignée d'une armature métallique ou composite avec un matériau donné permettant la mobilisation d'une réaction déterminée.

■ **Injection de régénération :**

Il s'agit de rendre à un matériau altéré, par exemple un mortier de hourdage, ses caractéristiques initiales.

## 2.13.3 CONNAISSANCE DU MILIEU À TRAITER

**> La connaissance du milieu impose la détermination de la nature du matériau à savoir :**

- la granularité ;
- la porosité ;
- la perméabilité ;
- les propriétés chimiques ;
- les conditions hydrauliques ;
- les propriétés mécaniques ;
- les conditions de surface.

**> Ces différents paramètres doivent permettre d'appréhender les problèmes suivants :**

- choix du produit à injecter ;
- conditions dans lesquelles l'injection doit être pratiquée ;
- possibilités d'injection du milieu ;

- critères d'injection pour éviter tout désordre supplémentaire ;
- efficacité et pérennité du traitement.

## 2.13.4 CHOIX DES COULIS D'INJECTION

**> Les coulis d'injection doivent être définis en fonction :**

- de la dimension des vides à combler ou de la perméabilité du sol, laquelle conditionne l'injectabilité ;
- du but de l'injection ;
- des propriétés chimiques du sol et de l'eau ;
- de leur efficacité et de leur état toxique et polluant ;
- de leur coût.

Le tableau ci-dessous extrait du document de **l'AFTES** présente schématiquement quelques exemples de coulis à mettre en œuvre en fonction de l'objectif de l'injection et des identifications du milieu à traiter.

| | | ÉTANCHEMENT | CONSOLIDATION |
|---|---|---|---|
| SOLS | **Alluvions grossières** | Argile - ciment<br>Bentonite - Ciment + Gel de silice | Ciment - Argile<br>Ciment - Bentonite + Gel |
| | **Sables** | Gel de bentonite<br>Gel de silice | Gel de silice + Ciment - Bentonite (clavage)<br>Gel de silice dur |
| | **Sables silteux** | Gel de silice très dilué<br>Résines acrylamides | Gel de silice (dur) à faible viscosité<br>Résines phénoliques |
| ROCHES | **Vides**<br><br>**Karsts, grosses fissures** | Argile (ou bentonite) - Ciment<br>Argile (ou bentonite) - Ciment + Charges ± grossières<br>Coulis aérés - coulis gonflants<br>Bitumes chauds … | Ciment - Argile (ou bentonite) + Charges ± grossières<br><br>Coulis mousse de ciment |
| | **Fissures moyennes** | Bentonite - Ciment<br>Bentonite - Ciment + Charges fines | Ciment<br>Ciment - Bentonite<br>Ciment - Bentonite + Charges fines |
| | **Fissures fines** | Bentonite - Ciment ultrafin (surbroyé)<br>Gel de silice + Bentonite - Ciment ultrafin (surbroyé) | Ciment ultrafin (surbroyé)<br>Ciment ultrafin (surbroyé)- Bentonite |
| | **Fissures très fines** | Gel de bentonite - de silice<br>Résines acrylamides | Gel de silice<br>Résines phénoliques |
| OUVRAGES | **Remplissage** | | Ciment - argile (ou bentonite) + Charges ± fines |
| | **Collage** | Bentonite - Ciment | Ciment + fluidifiant - stabilisant (bentonite) |
| | **Régénérations de maçonnerie à vides ouverts** | Bentonite - Ciment ultrafin (surbroyé)<br>Coulis aérés | Ciment ultrafin (surbroyé)<br>Ciment ultrafin (surbroyé) - Bentonite |
| | **Fissures actives** | Résines acrylamides<br>Gels mixtes<br>Émulsion de latex | |
| | **Fissures très fines** | Résines acrylamides | Epoxydes, polyester, …. |

***Tableau n° 1 : domaine d'application des coulis***

D'une manière générale, les grands vides seront traités avec des mortiers. Pour traiter les terrains meubles, on tiendra compte des caractéristiques des grains. Le tableau ci-dessous extrait de la publication de l'AFTES présente les limites d'injectabilité des sols en fonction de leur perméabilité.

***NOTE :*** *ce tableau ne tient pas compte de l'utilisation des super-plastifiants et des défloculants. Le mélange et l'utilisation d'un super-plastifiant permet d'obtenir un coulis très aéré qui peut pénétrer dans les matériaux dont la porosité est inférieure à $10^{-4}$ m/s.*

| COULIS | | | Consolidation (C) ou Étanchement (E) |
|---|---|---|---|
| CIMENT | | | C |
| ARGILE - CIMENT | | | EC |
| GEL D'ARGILE - BENTONITE défloculée rigidifiée | | | E |
| LIGNOCHROME | | | C |
| ÉMULSION DE BITUME | | | E |
| GEL de SILICE | de consolidation | Concentré | C |
| | | faible viscosité | C |
| | d'étanchement | Concentré | E |
| | | Très dilué | E |
| RÉSINES | ACRYLAMIDES | | E |
| | PHENOLIQUES | | C |
| CARACTÉRISTIQUES DU TERRAIN | | Perméabilité initiale k (en m/s) | |

| $5\text{-}10^{-1}$ 1 | $5\text{-}10^{-2}$ $10^{-1}$ | $5\text{-}10^{-3}$ $10^{-2}$ | $5\text{-}10^{-4}$ $10^{-3}$ | $5\text{-}10^{-5}$ $10^{-4}$ | $5\text{-}10^{-6}$ $10^{-5}$ | $5\text{-}10^{-7}$ $10^{-6}$ $10^{-7}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|

***Tableau n° 2 : coulis usuels en terrain meuble***

Les coulis à base de ciment sont utilisés dans des sols d'une perméabilité supérieure à $10^{-3}$ m/sec. Les coulis ternaires d'argile-ciment défloculés permettent cependant de traiter des terrains de perméabilité de l'ordre de $10^{-5}$ m/sec. Les coulis chimiques peuvent être utilisés dans des sols de perméabilité atteignant une perméabilité de $10^{-7}$ m/sec.

**> Les limites d'injectabilité de quelques coulis sont données dans le tableau ci-dessous :**

| Type de sol | Graviers et sables grossiers | Sables moyens à fins | Sables silteux ou argileux, silts |
|---|---|---|---|
| **Diamètre des grains** | $d_{10} > 0{,}5$ mm | $0{,}02 < d_{10} > 0{,}5$ mm | $d_{10} < 0{,}02$ mm |
| **Surface surfacique** | $S < 100$ cm$^{-1}$ | 100 cm$^{-1}$ $< S <$ 1 000 cm$^{-1}$ | $S <$ 1 000 cm$^{-1}$ |
| **Perméabilité** | $k > 10^{-3}$ m/s | $10^{-3} > k > 10^{-5}$ m/s | $k < 10^{-5}$ m/s |
| **Type de mélange** | Suspensions Bingham | Solutions colloïdales (gels) | Solutions pures (résines) |
| **Injection de consolidation** | Ciment | Gels de silice durs : | Aminoplastique |
| **Injection de consolidation** | ($k > 10^{-2}$ m/s) | **Double action Joosten** | Phénoplastique |
| | mélange aéré (1) | (pour $k > 10^{-4}$ m/s) | |
| | | **Action simple** | |
| | | Carongel | |
| | | Glyoxol | |
| | | Siroc | |
| **Injection d'imperméabilisation** | Mélange aéré | Gel de bentonite | Acrylamides |
| | Gel de bentonite | Lignochromate | Aminoplastique |
| | Gel d'argile | Carongel léger | Phénoplastique |
| | Argile/ciment | Gel de silice tendre | |
| | | Huiles vulcanisables | |
| | | Autres (Terranier) | |

***(1) l'aération est obtenue par malaxage à haute turbulence du mélange dans lequel est incorporé un liquide tensio-actif comme le Teepol ® ou un liquide similaire.***

***Tableau n° 3 : limites d'injectabilité***

**> L'efficacité des coulis est généralement liée à la taille des particules du coulis. Ainsi, on peut définir un coefficient d'injectabilité :**

■ **pour les sols :**

$$\frac{d_{15}\ (sol)}{d_{85}\ (coulis)} > 25$$

$d_{15}$ : dimension correspondant à 15% des tamisats cumulés d'une analyse granulométrique ou sédimentométrique.

■ **pour les milieux fissurés :**

$$\frac{d\ (fissure)}{d_{100}\ (coulis)} > 3$$

Ces deux conditions soulignent l'intérêt d'utiliser des coulis défloculés ou un ciment ultrafin (surbroyé).

## 2.13.5 ACCÉLÉRATION DE LA PRISE DU COULIS - TOXICITÉ DU COULIS

La prise du coulis peut être accélérée ou retardée par la présence de sels dissous dans l'eau ou par réaction chimique avec le sol. Un faible "pH" affecte les coulis de silicate. Les sulfates affectent certains coulis à base de ciment non compatibles **«ES».**

Par ailleurs, **certaines résines étant toxiques,** leur manipulation doit être effectuée avec certaines précautions. Elles sont aussi polluantes et, dans ce cas, il faudra analyser leurs effets sur l'environnement immédiat.

## 2.13.6 EFFICACITÉ DES COULIS

**> L'efficacité du coulis est fonction de nombreux paramètres :**

- viscosité du coulis préparé ;
- temps de prise du coulis ou de gélification ;
- stabilité ;
- faible sensibilité au délavage ;
- caractéristiques mécaniques finales et pérennité.

**> La mise au point de la formulation du coulis implique de réaliser des études préalables portant sur :**

- les composants : ciment, bentonite, sable ;
- le produit fini (coulis) et sur ses conditions de fabrication et d'utilisation.

**> Les études préalables comprennent principalement :**

- contrôle de densité (balance Baroïd) ;
- contrôle de fluidité ou viscosité (entonnoir de Marsh) ;
- détermination du temps de prise (aiguille du Vicat) ;
- essais de rigidité (scissomètre) ;

- exsudation ou décantation (éprouvette) ;
- résistance mécanique (écrasement à la presse) ;
- étude chimique (analyse chimique) ;
- courbe granulométrique (cas d'utilisation du sable), etc.

**L'épreuve de convenance** a pour but de vérifier si la formule établie en laboratoire conduit à des résultats satisfaisants dans les conditions de chantier en utilisant les matériaux et les matériels sur site et en tenant compte des conditions climatiques.

La première épreuve de convenance a lieu au plus tard 24 h avant le début des injections sur le chantier même. Le dosage en ciment des gâchés doit être adapté. Les gâchées de 50 kg de ciment sont adaptées aux conditions d'utilisation normale du malaxeur. Les conditions de fabrication seront les mêmes que celles utilisées pour confectionner le coulis d'étude, ou le coulis indiqué au titre des opérations données en référence.

**> Dans ce cas, les essais imposés se bornent généralement à :**

- densité de coulis à la balance Baroïd ;
- viscosité ou fluidité : 40 à 80 secondes, à l'entonnoir de Marsh (1,5 l, ajutage 4,75 mm) ;
- exsudation ou décantation : moins de 5 % après 3 heures sur une éprouvette de un litre.

## 2.13.7 PROJET DE TRAITEMENT PAR INJECTION LIQUIDE

**> Un traitement par injection nécessite la parfaite définition préalable des points suivants:**

### 2.13.7.1 Disposition des forages d'injection, leur espacement et leur longueur ainsi que leur diamètre

L'adaptation doit tenir compte du rayon d'action des coulis et des objectifs à atteindre. L'espacement peut varier selon les problèmes entre 1 et 5 m, voire 10 m. L'implantation sera fonction du rayon d'action présumé ou du volume traité à partir d'un forage (figure n° 24).

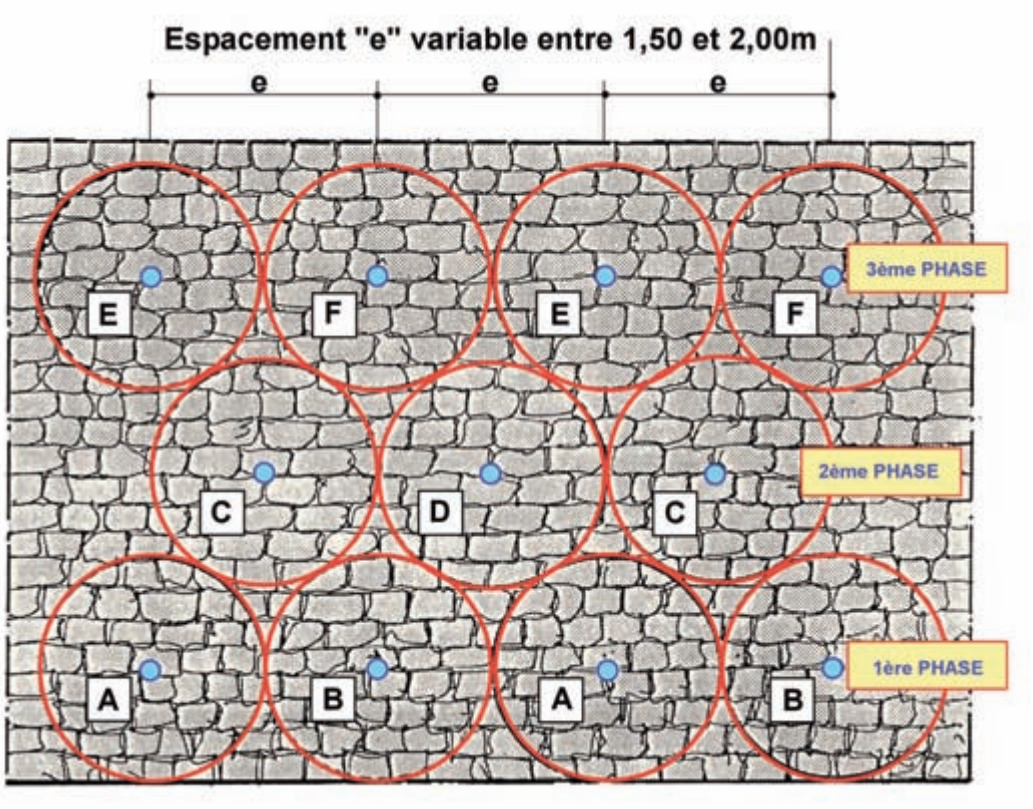



*Figure n° 24 : exemple d'espacement des forages*

## 2.13.7.2 Moyens de perforation

Ce sont la rotation, la roto-percussion, l'injection d'eau ou de coulis ciment-bentonite, l'utilisation d'un tubage simultané. Le choix du type de forage est déterminant. Il tient compte de la nature des matériaux à forer, de leur état, de l'outillage à installer en fonction du traitement à effectuer.

En aucun cas, le forage ne doit entraîner une déconsolidation des sols ou une érosion interne par circulation de fluide. Le forage se réalise sous surveillance permanente de l'ouvrage pour s'assurer que la technique envisagée est adaptée et le personnel formé.

## 2.13.7.3 Équipement des forages d'injection

**> Différents équipements sont envisageables selon les dispositions retenues pour introduire le coulis :**

- parois nues avec injection à l'avancement par passes ascendantes ou descendantes avec l'aide d'un obturateur simple (figure n° 25) ;
- tube métallique crépiné battu dans le sol (figure n° 26) ;
- tube plastique lisse scellé au coulis de gaine et découpé progressivement selon deux génératrices avec injection simultanée par passes remontantes ;
- tube plastique ou métallique à manchettes scellé au coulis de gaine et injecté par passes ascendantes ou descendantes avec l'aide d'un double obturateur (figure n° 27) ;
- tube plastique ou métallique à manchettes scellé avec des sacs séparateurs et injecté par passes ascendantes ou descendantes avec l'aide d'un double obturateur.

Des forages évents peuvent permettre de suivre l'élévation du niveau des mélanges injectés en disposant à différentes altitudes des évents provisoires (en plastique souple) qui indiquent le degré de remplissage du coulis à l'intérieur de la zone concernée.

Dans des injections de zones sous la nappe, quelques évents peuvent assurer un départ plus facile de l'eau et ce, d'autant que l'on aura procédé à un encagement préalable limitant la zone.

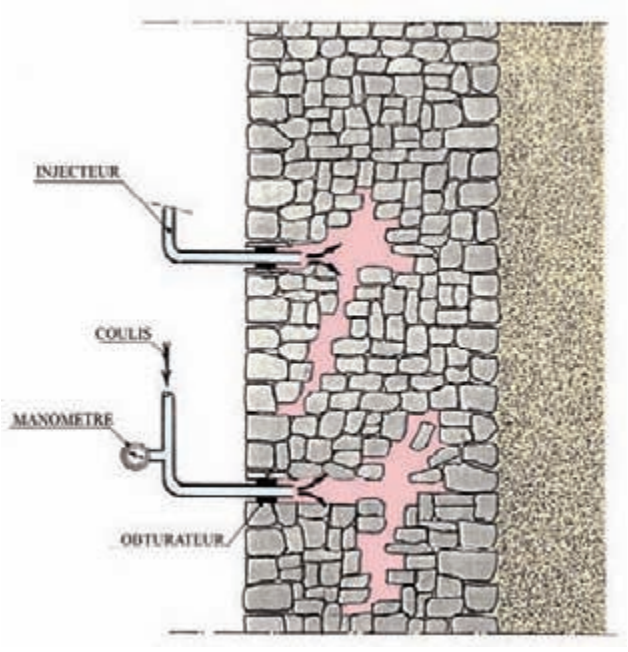



***Figure n° 25 : injection à l'avancement par passe descendante***

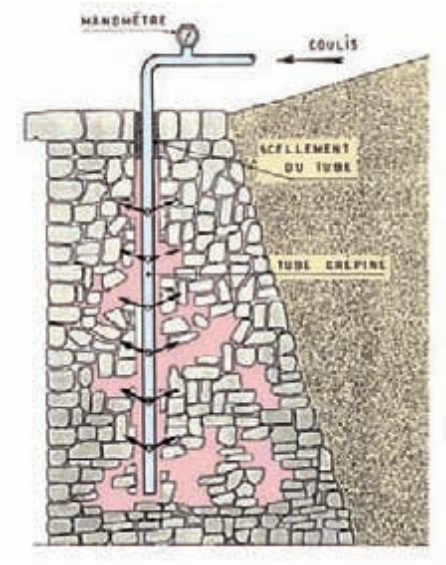



*Figure n° 26 : injection au tube crépiné*

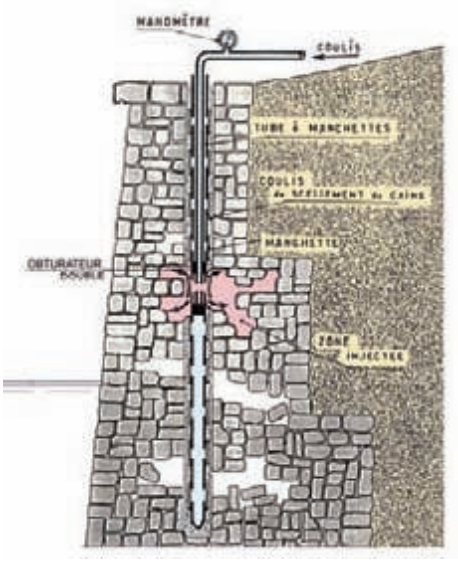



*Figure n° 27 : injection au tube à manchettes*

L'équipement **«parois nues»** est intéressant dans le cas où les parois du forage sont parfaitement stables. L'injection se fait principalement par passes ascendantes. Cependant, ce mode d'injection est également retenu pour des terrains difficiles avec injection par passes descendantes et reperforation successives.

L'équipement **«tube métallique crépiné»** peut être envisagé dans des terrains pulvérulents boulants. Il y a intérêt à coiffer le tube crépiné par un tube lisse pendant le battage pour éviter l'introduction de sable dans la crépine.

L'équipement **«tube plastique découpé»** présente un grand intérêt dans des terrains très hétérogènes car il offre une possibilité d'injection selon une ligne continue.

L'équipement **«tube à manchettes»** a le grand avantage de permettre le traitement à n'importe quel niveau et autant de fois que cela est nécessaire car, après chaque injection, on peut laver le tube. Cependant, il peut conduire à des faux refus si le matériau à injecter est trop rigide car, dans ce cas, le coulis de gaine ne peut pas être claqué pour des pressions raisonnables. Aussi, on peut alors recourir aux séparateurs de tranches qui évitent l'usage du coulis de gaine.

## 2.13.7.4 Composition de la centrale d'injection

Elle doit permettre la fabrication des coulis de qualité régulière selon une formulation définie au préalable. Elle doit comporter un ensemble de stockage des matériaux d'injection, un système du dosage et de malaxage des presses d'injection et un équipement permettant de contrôler les quantités et les pressions d'injection (se reporter au paragraphe 3.5 ci-dessous qui traite des matériels à utiliser).

## 2.13.7.5 Définition des coulis

La nature et la composition des coulis doivent être parfaitement définies et leurs principales caractéristiques doivent être connues, à savoir : viscosité au cône de Marsh, pourcentage d'exsudation, temps de prise, densité et résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours.

Les adjuvants éventuels doivent être parfaitement déterminés.

## 2.13.7.6 Définition des critères d'injection

**> Pour l'injection proprement dite, il faut préciser :**

- la progression des niveaux d'injection ;
- la cadence d'injection ;
- la quantité d'injection par passe ;
- la pression à ne pas dépasser.

En règle générale, l'injection consiste en un remplissage ou une imprégnation. Aussi, on doit retenir dans le premier cas un critère de pression avec la possibilité d'injecter par phases successives alors que dans le second cas, on s'impose une quantité prédéterminée avec un critère de pression pour éviter le claquage du sol ou des soulèvements ou encore tout autre désordre à éviter.

### 2.13.7.6.1 Cadence d'injection

La cadence d'injection est un élément important, qui est fonction du type de traitement (imprégnation, claquage, comblement, ...), du milieu, de la nature du coulis, de son temps de prise et des pressions autorisées par le contexte.

Ce paramètre du débit conditionne une large partie du résultat du traitement, en particulier dans le cas de consolidation d'un sol pulvérulent situé sous une fondation superficielle. Les cadences peuvent varier de 1 $m^3$/h à 0,5 $m^3$/h dans des sols très perméables, à 0,3 $m^3$/h sous une fondation en état de stabilité précaire. La cadence est réduite à 0,1 $m^3$/h en moyenne dans une maçonnerie dont on veut régénérer le mortier de hourdage.

### 2.13.7.6.2 Volume de coulis

Le volume de coulis à introduire doit être apprécié avant le démarrage des travaux. Il est évalué à partir des travaux de reconnaissance des différents horizons à renforcer ou à combler. Dans un massif de béton de chaux hydraulique, un volume de 5 à 10% de coulis est une base à apprécier à partir de l'état de dégradation du milieu. Il faut noter qu'un traitement comportant un remplissage à 100% de tous les vides entre les granulats n'est pas à rechercher dans la mesure où l'objectif est d'améliorer le comportement observé.

Dans un sol granulaire de fondation, l'objectif est souvent d'améliorer les caractéristiques mécaniques pour améliorer la sécurité vis-à-vis de la portance et des tassements. Un traitement comportant une incorporation de 5 à 7% du volume à traiter est une base suffisante. Le traitement étant ici une imprégnation, la cadence se doit d'être faible et de l'ordre de 0,3 à 0,4 $m^3$/h pour éviter le claquage du sol.

### 2.13.7.6.3 Pression d'injection

En cas d'injection par branchement direct en tête (hauteur de la colonne de mortier + pression éventuelle), il faut introduire une limite pour éviter que le mortier ne désorganise brutalement le sol en place.

Pour les travaux d'imprégnation avec tube à manchettes, il faut limiter la pression pour éviter les claquages du terrain qui conduiraient à une déperdition inutile de produit. La pression correspondante au claquage est difficile à évaluer a priori et sa valeur est à précisée en cours d'injection.

Lorsque le coulis progresse par claquage, la limitation à fixer pour le paramètre pression est moins importante. Une valeur doit néanmoins être fixée comme garde-fou pour éviter notamment de créer des points durs. La pression transmise à la fondation par la pile pourra servir de valeur de référence pour fixer cette valeur limite supérieure.

Les pressions d'incorporation du coulis dans le milieu différent de celles observées et relevées sur les manographes enregistreurs. Une détermination des pertes de charge est nécessaire au démarrage des travaux pour justifier des pressions affichées et contrôlées. Cette détermination tient compte de la cadence, aussi plusieurs mesures sont nécessaires en faisant varier la quantité de coulis injectée par minute.

## 2.13.7.7 Ordre d'injection

**L'ordre d'injection des forages doit être défini avant le début des travaux.** C'est un élément très important pour la sécurité de l'ouvrage. L'objectif est d'aboutir à un traitement homogène sous l'appui et d'éviter de créer des points durs.

Habituellement, on injecte par file en cherchant à fermer le volume de terrain à traiter afin de pouvoir claver par les forages intérieurs. Sur une même file, il est préférable d'injecter un forage sur deux pour terminer par les forages intermédiaires. Il faudra toujours s'assurer que l'eau interstitielle peut être chassée par le produit d'injection et donc prévoir le cas échéant des évents.

Pour un comblement de cavités, l'injection peut s'effectuer par un branchement direct en tête de forage.

**> En revanche, dans les autres cas, il est de loin préférable d'utiliser la technique du tube à manchettes dans un coulis de gaine, car ce procédé permet :**

- d'injecter à des niveaux précis isolés du restant du forage ;
- de faire à un même niveau les injections en plusieurs fois (autant que cela sera nécessaire).

**> Ordre d'injection des passes :**

Les injections en faible profondeur dans le sol sont délicates à mener en raison de la faible pression de confinement existante. Il est préférable de commencer par injecter les vides situés immédiatement sous la base pour rétablir la continuité sol-appui et constituer un certain toit pour les injections plus profondes. L'injection sera donc conduite par passes descendantes pour les deux mètres supérieurs, les horizons plus profonds pouvant être traités ensuite en remontant.

## 2.13.7.8 Suivi d'exécution des injections

**> La campagne d'injection doit comporter un certain nombre de contrôles systématiques pour apprécier son efficacité. Ce sont :**

- la réception des matériaux d'injection ;
- la qualité des coulis (mesure de la densité et de la viscosité pour le coulis de ciment, de temps de prise pour les coulis chimiques) ;
- la résistance des coulis (résistance à la compression simple) ;
- la variation des débits d'injection ;
- les pertes de charges dans les canalisations de distribution des coulis ;
- les quantités de coulis absorbés à différents niveaux de chacun des forages ;
- la surveillance topographique de l'ouvrage pour s'assurer d'éventuels mouvements (soulèvement, tassement, basculement) ;

- la surveillance des résurgences de coulis afin d'adapter les coulis d'injection aux cas particuliers en limitant leur rayon d'action, soit en les épaississant, soit en les rigidifiant par un ajout de silicate ;
- la surveillance des ouvrages souterrains voisins.

Enfin, le déroulement de tous travaux d'injection doit être consigné quotidiennement dans **un carnet de chantier** précisant les conditions de perforation, les incidents de perforation, la configuration des équipements, les détails d'injection (nature des coulis, nombre de passes, pression, quantité, débit) et les incidents d'injection (fissuration, résurgences, mouvement du sol ou de la fondation).

## 2.13.7.9 Incidents en cours d'exécution des travaux

**> Sans être très exhaustif, on peut signaler quelques causes d'incidents fréquents :**

- absence de montée en pression ;
- montée brutale et imprévisible de la pression ;
- consommation anormalement élevée de coulis ;
- autres causes d'incidents.

### 2.13.7.9.1 Absence de montée en pression

**> Ceci ne signifie pas obligatoirement que le traitement est inefficace, mais cet incident peut avoir différentes raisons :**

- le volume des vides à remplir s'avère nettement supérieur à celui estimé. Il faut alors poursuivre le remplissage par les autres forages et, au besoin, revenir sur le premier ;
- il peut y avoir des fuites dans les ouvrages avoisinants les terrains contigus ou des résurgences dans une nappe ou un cours d'eau voisin. Il faut donc arrêter le traitement sur un volume prédéterminé par forage ou par passes (comme cela doit être dans la procédure) et, au besoin, épaissir le coulis.

### 2.13.7.9.2 Montée brutale et imprévisible de la pression

**> Il est important d'arrêter l'opération et d'analyser les causes les plus courantes :**

- cette montée brusque peut provenir d'un colmatage du dispositif d'injection, d'une décantation concentrée dans la maçonnerie ou le massif de fondation ou d'un bouchon formé dans l'injecteur. Il est nécessaire de poursuivre alors sur d'autres forages ;

- blocage brutal et anormal de la pression. Si le phénomène est systématique, la formulation du coulis est sans doute mal adaptée ; il convient alors de changer les caractéristiques du coulis au profit d'un mélange plus pénétrant ;
- en cas de maintien d'une pression stable élevée supérieure à la contrainte verticale, faire très attention à un risque de soulèvement par effet de vérin.

#### 2.13.7.9.3 Consommation anormalement élevée de coulis

Ceci peut se traduire, sans qu'il y ait fuite, par une résurgence ou une perte de coulis dans les volumes contigus.

Le rayon d'action du mélange est peut-être important ; il faut alors procéder par phases et, surtout, revoir la composition du coulis en tendant à le rigidifier (ajout de silicate, par exemple).

#### 2.13.7.9.4 Autres causes d'incidents

Les causes d'incidents en cours d'injection sont multiples et ne peuvent pas être toutes prévues ou classifiées. C'est précisément l'expérience et la pratique de cette discipline qui, dans la plupart des cas embarrassants, donnera une solution adaptée au problème rencontré.

Il faut veiller aux surpressions créées par l'introduction des coulis, qui peuvent avoir un effet déstabilisateur sur un élément d'ouvrage ou avoir un effet de vérin.

Par ailleurs, le coulis est un milieu visqueux qui, en conséquence, détruit, en cours de mise en œuvre, tout le frottement qui pouvait régner entre les différentes parties. Se propageant le long des interfaces, le coulis peut conduire à des tassements importants des fondations sur pieux, par exemple si les volumes introduits sont importants. Le long de surfaces de glissement, le coulis va réduire notablement la résistance au cisaillement et il peut provoquer des désordres.

## 2.13.7.10 Surveillance de l'ouvrage

**> Tous ces travaux doivent être effectués sous une surveillance attentive de l'ouvrage qui combinera :**

- l'observation attentive des abords de l'appui et du cours d'eau pour détecter toute résurgence ;
- une surveillance de la géométrie de l'ouvrage ;
- un suivi de la fissuration existante.

**Le maître d'œuvre** se doit de procéder avec **l'entrepreneur** à un relevé contradictoire des désordres avant le début des travaux.

Les travaux d'injection en reprise de fondation conduisent très souvent à des désordres mineurs (tassement, soulèvement, basculement) d'amplitude très limitée lorsque l'injection est conduite correctement (mouvements millimétriques).

Pour être certain de la signification des mesures et pour prendre toute mesure utile pour la sécurité, il est essentiel de connaître avec précision l'erreur entachant les mesures. L'incertitude une fois appréciée (par de nombreuses mesures faites avant le début du chantier), on peut fixer comme seuil, pour l'interruption des injections, la valeur de deux à trois écarts types (si cette amplitude est jugée acceptable. Dans le cas contraire, cela signifie que le dispositif de surveillance n'a pas une précision suffisante et doit être révisé).

## 2.13.7.11 Contrôle de l'efficacité des travaux

L'efficacité des travaux dépendra d'une adaptation bien conduite et constante du déroulement des injections aux aléas rencontrés. En effet, le fait de réaliser de nombreux forages pour incorporer le coulis permet au cours du chantier d'obtenir une meilleure connaissance de l'ouvrage par le nombre de forages réalisés. Cette connaissance permet d'adapter en tant que besoin le programme d'injection et les paramètres.

**> Les travaux de contrôle de l'efficacité du traitement porteront sur les mesures permettant de vérifier les objectifs de l'opération. Ce seront les travaux suivants :**

- dans les sols dont on veut améliorer les propriétés mécaniques, réalisation d'essais pressiométriques permettant de mesurer les caractéristiques des sols avant et après travaux et l'homogénéité du traitement ;
- dans la maçonnerie et les massifs de fondation, carottage en gros diamètre (Ø 131 mm) effectué **au minimum 4 à 6 mois après l'exécution de l'injection**[4] pour visualiser les comblements de fissures par du coulis ou l'imprégnation du béton de chaux ;
- mesure de perméabilité (essais Lefranc ou essais d'eau à charges variables limitées à 4 bars) et comparaison avec les valeurs mesurées avant injection ;
- dans le cas d'un comblement, mesure des caractéristiques des coulis prélevés par carottage pour comparaison avec celles obtenues sur les prélèvements effectués à la centrale d'injection ;
- micro-sismique et imagerie sur les parois d'un forage pour vérifier l'amélioration par réduction des discontinuités et des fissurations du milieu maçonné ;
- éventuellement observation directe par enlèvement de quelques pierres de parement.

[4] *Le marché doit être adapté pour permettre ce contrôle retardé en attendant la prise totale des coulis.*

## 2.14.1 TRAITEMENT DES SOLS PAR INJECTION SOLIDE

Le principe de l'injection avec déplacement des sols est décrit dans le guide **STRRES FAFO 1** relatif à la réparation et au renforcement des fondations.

Pour des ouvrages établis sur fondations superficielles ou sur pieux en bois flottants et dont les sols de fondation présentent des caractéristiques mécaniques de faible valeur, la technique d'injection solide ou d'incorporation de mortier par compactage statique horizontal permet d'améliorer la stabilité vis-à-vis du poinçonnement et d'éviter des tassements absolus ou différentiels.

Cette technologie serait, théoriquement, applicable à des fondations sur pieux en bois, mais **elle n'y a jamais été appliquée.** En effet, la difficulté provient, dans ce cas, de réaliser suffisamment de forages verticaux situés entre les pieux pour traiter les sols sous la pointe des pieux.

Des injections solides ont été effectuées pour conforter des fondations d'ouvrages établis superficiellement sur massif de béton de chaux reposant sur des sables plus ou moins argileux avec inclusions de niveaux d'argile. Lors de ces travaux ont été réalisés des forages verticaux pairs et impairs formant encagement périphérique aux fondations, puis des forages tertiaires, puis quaternaires inclinés vers l'axe de l'appui pour renforcer les sols encagés situés sous les semelles (figure n° 28).

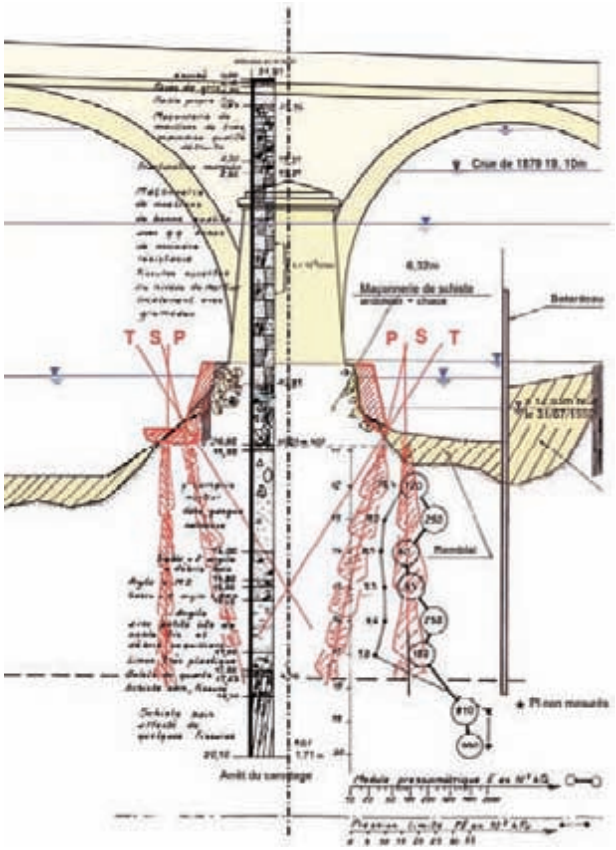



*Figure n° 28 : réalisation d'une injection solide de renforcement de la portance d'une fondation du pont de Verdun à ANGERS*

L'intérêt de cette technique, qui est bien maîtrisée par des professionnels de l'injection, est de rendre le sol homogène dans ses propriétés mécaniques en resserrant les horizons plus lâches et sans modifier les horizons déjà denses. Les colonnes de mortier sec incorporé sont d'un diamètre variable, fonction des volumes incorporés par couche.

Les limitations d'application de ce type de travaux d'incorporation de mortier proviennent du type de matériaux pouvant être densifié par un serrage sous pression. Ce sont donc les sables fins et les sables limoneux qui sont les plus aptes à la densification. Les sols cohérents fins saturés peuvent être déplacés par l'injection du mortier, mais la dissipation des pressions interstitielles pourra entraîner de légers tassements.

Les sols de surface, sur une épaisseur de 2 m, ne peuvent pas être traités par injection solide sans provoquer des déplacements sous forme de soulèvements. Dans un tel cas, il faut que les déplacements n'endommagent pas les fondations.

## 2.14.2 TRAITEMENT DES SOLS PAR COLONNE DE «JET-GROUTING»

Cette technique est présentée dans le guide **STRRES FAFO 1** susvisé.

La technique du **«jet grouting»** est un procédé de traitement dans la masse d'un matériau par une injection à grande vitesse et pression de fluides et coulis d'une manière continue ou discontinue, en colonnes ou parois.

L'action sur le matériau est une destruction hydrodynamique et une extraction par lavage et entraînement de fines puis une injection et mélange d'un coulis de substitution. Il est nécessaire de contrôler les paramètres de l'injection et le rejet.

Le mode d'injection par projection des fluides et coulis est décrit sommairement dans le dossier précité.

> *Les effets sur le matériau en place sont une déstructuration avec entraînement des particules fines selon la vitesse ascensionnelle. Durant cette phase,* ***il y a affaiblissement momentané des caractéristiques des sols*** *et rejet d'eau, de sols fins et de coulis de ciment. Après durcissement, il y a formation de colonnes par cimentation des grains de sol et amélioration de la résistance des sols.*

Cette formation de colonnes peut être utilisée pour créer des engagements au pourtour des fondations anciennes formant parafouille et limitant un volume de sol pouvant être traité par une technique d'injection liquide, par exemple.

Cette technique est à envisager avec beaucoup de précaution sur des fondations anciennes qui seraient en état précaire. Le traitement présente une phase de destruction des sols et d'incorporation d'un coulis très fluide mélangé à l'eau et au sol, qui ne présente, sur quelques heures, aucune résistance mécanique. La procédure d'exécution doit en tenir compte et limiter les cadences d'exécution pour ne pas déstabiliser l'ouvrage.

## 2.15.1 LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES D'AMÉLIORATION DE LA PORTANCE

Le diagnostic d'état et de comportement des fondations doit mettre en évidence les différents niveaux de sécurité vis-à-vis de la portance et des déformations. La reconnaissance géotechnique des sols doit permettre, avec des essais fiables du point de vue qualité des essais et une démarche justificative élaborée, de qualifier les sécurités sous les actions exercées lors des situations durables (phase d'exploitation de l'ouvrage) mais aussi lors des situations transitoires (phase des travaux).

Si un ouvrage n'a pas été soumis à des tassements différentiels significatifs, il n'en présente pas les désordres caractéristiques. Dans un tel cas, il est possible de considérer que la sécurité au poinçonnement et aux tassements absolus et différentiels est assurée. L'ouvrage ne nécessite, à minima, que des travaux de protection des sols ou d'amélioration de l'encastrement de ses fondations ou de réparation de dégradations superficielles.

Cependant, le diagnostic sur l'état et le comportement des fondations peut conduire à mettre en évidence un défaut de portance des sols de fondation. Lorsque cet état est mis en évidence par un recalcul de la sécurité selon les règles en vigueur, le manque de sécurité doit apparaître sous forme d'un petit déplacement d'appui montrant ainsi que les sols de fondation sont soumis à une contrainte proche ou égale de la valeur de la contrainte de fluage.

**> Quand les tassements évoluent au cours du temps sous les charges d'exploitation, l'origine est à rechercher :**

- dans la présence dans les sols de fondation d'une épaisse couche compressible et d'une augmentation relative des charges d'exploitation ;
- dans la formation de cavités par érosion des sols sous le massif ou la semelle de fondation.

Lorsqu'un ouvrage présente une insuffisance de portance des appuis, les solutions envisageables sont examinées ci-après avec les critères principaux d'orientation du choix d'une solution de confortement.

## 2.15.2 PREMIÈRE SOLUTION : RÉDUIRE LES CHARGES APPLIQUÉES AU SOL

Il est envisageable de réaliser des élégissements sur la structure et/ou de remplacer les matériaux de remplissage par des produits légers. Cette réduction des charges peut s'appliquer aussi bien aux ouvrages fondés superficiellement qu'à ceux établis sur fondations profondes.

Il est à noter que de nombreux d'ouvrages en maçonnerie sont élégis sans que les élégissements ne soient visibles (se reporter à **l'annexe n° 2** [guide FABEM 6.4]). Ces élégissements d'origine avaient pour buts une économie de matériaux et une réduction des charges appliquées sur les fondations.

La réalisation d'élégissements sur un ouvrage existant est exceptionnelle. **La substitution du matériau de remplissage** est une solution envisageable, bien qu'elle ne soit pas aisée de mise en œuvre, car il faut substituer, à un grand volume de matériaux de remblais, un matériau porteur très léger pour atteindre une certaine efficacité (se reporter à la partie du **guide 6.2** qui traite du choix et de la mise en œuvre des matériaux de remplissage).

***REMARQUE :*** *si réduire les charges permet de redonner une sécurité vis-à-vis de la portance, cette solution n'est généralement pas pérenne. Elle doit être étudiée sous tous ses aspects et, en tout état de cause, il faut examiner aussi les solutions, comme les protections des sols ou des appuis, qui évitent ou empêchent l'affaiblissement des sols porteurs.*

## 2.15.3 DEUXIÈME SOLUTION : AMÉLIORER LA RÉPARTITION DES PRESSIONS SUR LE SOL SOUS LA FONDATION

**> Plusieurs méthodes sont envisageables, il y a lieu de citer :**

- le radier général avec un corsetage au pourtour des appuis. Dans ce cas, le radier devient partiellement porteur ;
- le simple voile disposé au pourtour des appuis, formant parafouille et encagement des sols;
- des barres scellées par injection dans le sol au pourtour et sous la fondation ;
- l'augmentation de l'encastrement de la fondation ;
- la modification de la fondation superficielle en fondation de type mixte au moyen de picots.

Ces différentes techniques s'appliquent essentiellement aux fondations superficielles sur semelles en maçonnerie ou sur massif en béton de chaux.

**Les solutions de radier et de corsetage** au pourtour de l'appui élargissent la base de celui-ci, l'enserrent, assurent un frettage pour transférer les charges aux sols sans nécessiter des travaux d'amélioration des caractéristiques mécaniques.

**La technique des barres scellées** s'apparente aux inclusions en améliorant notablement la résistance au cisaillement du sol. L'intérêt est de réaliser, à sec autant que possible, deux lignes d'encagement périphérique avant de traiter par des lignes de barres scellées inclinées sous la fondation. La technique est différente de celle de l'injection, les barres étant seulement scellées gravitairement dans un forage.

**L'augmentation de l'encastrement de la fondation** s'applique aux fondations superficielle et profonde. Néanmoins, en général, comme on cherche à améliorer le débouché hydraulique, l'augmentation de l'encastrement de la fondation est réservée aux fondations profondes. Cette opération, peut consister, par exemple, à construire une enceinte de confinement et à transformer la fondation sur pieux en une fondation sur massif encastré.

**La modification de la fondation superficielle en fondation mixte** consiste essentiellement à ajouter au pourtour de l'appui des petites fondations type inclusions rigides battues ou forées venant former un encagement en éléments discontinus ou tangents. Quand ils sont tangents, voire sécants, ces éléments verticaux forment un parafouille au pourtour de l'appui.

***REMARQUE :*** *ces différentes techniques présentent un avantage certain qui est de conserver le fonctionnement de l'ouvrage avec ses descentes de charges verticales sur le sol. Les matériaux sont conservés en compression. Les phases intermédiaires des travaux sont à étudier avec précision. Par exemple : la protection finale des sols au pourtour des fondations traitées.*

## 2.15.4 TROISIÈME SOLUTION : AMÉLIORER LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS

**> Plusieurs méthodes sont envisageables, il y a lieu de citer :**

- l'injection des sols sous faible pression et faible débit ;
- l'incorporation de mortier sec sous pression (compactage statique horizontal ou injection solide).

Ces techniques sont applicables aux fondations superficielles comme aux fondations sur pieux en bois, en béton ou en fonte moulée.

Ces deux techniques ont le même objectif, celui d'augmenter la résistance mécanique des sols par un serrage des grains : dans un cas, en forçant un coulis à pénétrer entre les grains et, dans l'autre cas, par action d'un compactage statique en incorporant un mortier sec sous forte pression. Ces techniques sont sommairement présentées dans les paragraphes ci-devant.

Les injections liquides de coulis de ciment, de ciment fin ultrafin (surbroyé) ou de ciment défloculé sont limitées aux sols granulaires à perméabilité relativement élevée. Souvent, on limite le volume de traitement des sols par un encagement sous forme d'une enceinte verticale en palplanches formant également parafouille. Les précautions de mise en œuvre portent sur les paramètres de l'injection, pression, volume par tranche et débit et sur le suivi des non-déplacements de l'ouvrage de type tassement ou soulèvement.

L'injection liquide est également adaptée pour améliorer le frottement latéral des sols sur les pieux.

***ATTENTION :*** *dans le cas de pieux flottants[5], l'introduction de coulis visqueux qui circule au pourtour d'un pieu en cours d'injection* ***détruit totalement le frottement*** *tant que la prise du coulis n'est pas faite.*

Pour les fondations anciennes, antérieures aux années 1860/1870 environ et comportant un platelage reposant sur des pieux en bois, il faut vérifier qu'il existe un vide d'origine sous le platelage et parfois des enrochements venant contrebuter les pieux. Ce niveau de vide, comblé parfois de dépôts fins vasards, n'est pas injectable au sens de la consolidation avec transfert des charges à un massif de sol traité par injection. Sauf cas très particulier, ce transfert de fondation profonde en fondation superficielle sur massif de sol renforcé n'est pas à rechercher.

L'injection solide ou compactage statique horizontal s'applique aux deux types de fondation superficielles et profondes établies sur des sols fins à grossiers aux caractéristiques mécaniques faibles à peu élevées.

Une étude spécifique par des techniciens ayant déjà pratiqué l'injection solide en site vierge est recommandée.

***REMARQUE :*** *Ces techniques, comme les précédentes, conservent le fonctionnement de l'ouvrage et le transfert des charges par compression dans les maçonneries.*

## 2.15.5 QUATRIÈME SOLUTION : REPORTER LES CHARGES EN PROFONDEUR

### 2.15.5.1 Les différentes techniques utilisables

- des colonnes de « jet-grouting » réalisées sous le niveau d'appui de la fondation ;
- des pieux réalisés au pourtour des appuis sous hauteur réduite ;
- des micropieux forés et ancrés en profondeur situés à l'extérieur de l'ouvrage ou à travers la pile et l'ancien massif de fondation.

La technique de réalisation de colonnes de **«jet-grouting»** sous un appui en maçonnerie a été présentée dans un paragraphe précédent. Elle s'applique aux ouvrages fondés superficiellement et plus difficilement aux ouvrages fondés sur pieux. Pour ces derniers, l'exécution de nouvelles colonnes porteuses pourrait être en principe envisageable sous réserve d'une étude spécifique montrant l'intérêt technique et économique et montrant, qu'en phase transitoire d'exécution, l'ouvrage ne risque pas d'être mis en péril.

[5] *Des pieux flottants sont des pieux dont la pointe ne repose pas sur une couche de sol résistante. La portance de tels pieux, en l'absence d'effet de pointe, est uniquement assurée par le frottement latéral qui s'exerce entre le sol et la surface des pieux.*

Dans quelques cas rares, des ouvrages en maçonnerie ont été repris en sous-œuvre par des colonnes de « jet-grouting ». Il s'agissait de modifier le type de fondation en ajoutant des colonnes porteuses avant de procéder à des rempiétements de quai ou de creuser un tunnel en sous-œuvre sous les ouvrages.

**La technique de réalisation de nouveaux pieux sous hauteur réduite** au pourtour des appuis est une solution venant substituer totalement, à la fondation ancienne, une nouvelle fondation extérieure à l'appui, avec transfert des charges par un corset fretté et contraint sur la maçonnerie ancienne. Cette technique est lourde et délicate, car l'exécution des nouvelles fondations se réalise pendant une phase où les fondations existantes sont instables et, de plus, **l'opération de transfert des charges entraîne, généralement, un tassement d'appui.**

Ces techniques de pieux et colonnes de «jet-grouting», qui ont pour objet de transférer les charges dans un horizon porteur, nécessitent un report des charges sur ces nouveaux éléments. Leur exécution et le report des efforts nécessitent une étude spécifique.

## 2.15.5.2 Technique des micropieux

**La technique des micropieux forés et ancrés par scellement en profondeur** est à réserver aux fondations profondes traversant des horizons compressibles où les autres techniques de renforcement des sols sont inadaptées. Elle est à étudier et à retenir, si besoin, pour les reprises en sous-œuvre des fondations d'ouvrages établis sur pieux qui présentent des instabilités d'origine sous forme de tassements absolus et différentiels.

Cette technique est assez répandue en bâtiment mais est nettement moins adaptée aux confortements de fondation des ouvrages d'art anciens en maçonnerie.

La solution micropieux en renforcement des fondations des ponts en maçonnerie est souvent préconisée par facilité lors d'un diagnostic trop superficiel sur les sols et par manque de réflexion.

Cette technique est présentée dans le guide **STRRES FAFO 1** susvisé. Le chapitre correspondant s'applique aux bâtiments et aux ouvrages d'art. Nous ferons la distinction entre ces deux types de structure, en reconnaissant que les bâtiments exercent des actions de faible valeur, contrairement aux ouvrages d'art en maçonnerie qui exercent des actions très élevées sur le sol. Les références et exemples donnés dans ce document s'appliquent d'ailleurs exclusivement aux bâtiments.

**> La solution de transfert des actions exercées par un ouvrage d'art sur le sol consiste à reporter ces actions dans un horizon résistant par la mise en œuvre de nombreux micropieux. Elle nécessite d'élaborer un diagnostic complet et fiable permettant d'étudier :**

- la zone de scellement des micropieux où les efforts seront transmis par frottement latéral essentiellement ;
- les conditions de transfert des actions de l'ouvrage sur la nouvelle structure et les déformations à accepter par l'ouvrage du fait du raccourcissement élastique des structures additionnelles lors de leur mise en charge ;

- les conditions de transfert des charges de compression dans la maçonnerie de l'ouvrage d'art aux nombreux éléments de petit diamètre reprenant les actions pour les transférer aux sols ;
- les **procédures d'exécution** dans chacune des phases de travaux afin de déterminer les différentes précautions à prendre pendant les diverses opérations.

Des spécifications concernant la réparation et le renforcement par pieux et micropieux sont données dans la norme **NF P 95.106 :** réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie.

**> Sont explicitées ci-dessous quelques cas d'applications justifiées de renforcements par micropieux :**

- la solution suivante s'applique si un ouvrage présente des tassements de grande amplitude (centimétrique) ; elle consiste à la mise en œuvre de quelques micropieux, venant compléter la portance de la fondation en reprenant le supplément de charge ce qui permet d'arrêter les mouvements. Un exemple est donné par le pont de Pierre de Bordeaux où trois appuis de la rive gauche ont vu leur fondation renforcée par l'exécution de 16 à 20 micropieux permettant de reprendre un tiers de la charge totale exercée. En effet, le tassement des appuis s'est arrêté quand, après raccourcissement élastique des micropieux, il y a eu transfert partiel de la charge totale sur ceux-ci et déchargement partiel de la fondation d'origine ;
- un autre exemple est donné par le cas d'un ouvrage construit sur une argile compressible et pour lequel l'ajout de plusieurs micropieux a permis d'arrêter les tassements. En complément, un rechargement a permis de redonner à l'ouvrage un profil en long satisfaisant.
- un autre cas de la nécessité d'une reprise en sous-œuvre par micropieux est celui d'un barrage-écluse édifié sur pieux bois battus dans les alluvions argileuses et enchâssés dans un massif de béton de chaux délavé et défaillant, au point de ne plus transférer les charges, faute de liaison entre le massif de béton et les pieux. Dans ce cas, les micropieux sont venus se substituer aux fondations d'origine insuffisantes pour reprendre les charges et les efforts parasites. Toutefois, il est nécessaire que les maçonneries soient de très bonne qualité pour transférer les charges aux nouvelles fondations. Elles travaillent au cisaillement au niveau du scellement des micropieux sur la structure maçonnée, ce qui peut nécessiter, à ce niveau, un corsetage de la structure.
- la figure ci-dessous montre un exemple de reprise en sous-œuvre d'un pont à plusieurs arches en maçonnerie établi sur pieux en bois traversant une épaisse couche de sol compressible et dont le tassement avait atteint 24 mm en 5 ans. Les micropieux disposés à l'extérieur du massif de fondation ont été reliés à la structure par un corset métallique précontraint sur le massif de béton de chaux. Comme dans plusieurs des exemples susvisés, les micropieux mis en œuvre ne reprennent pas la totalité de la descente de charges de l'ouvrage.

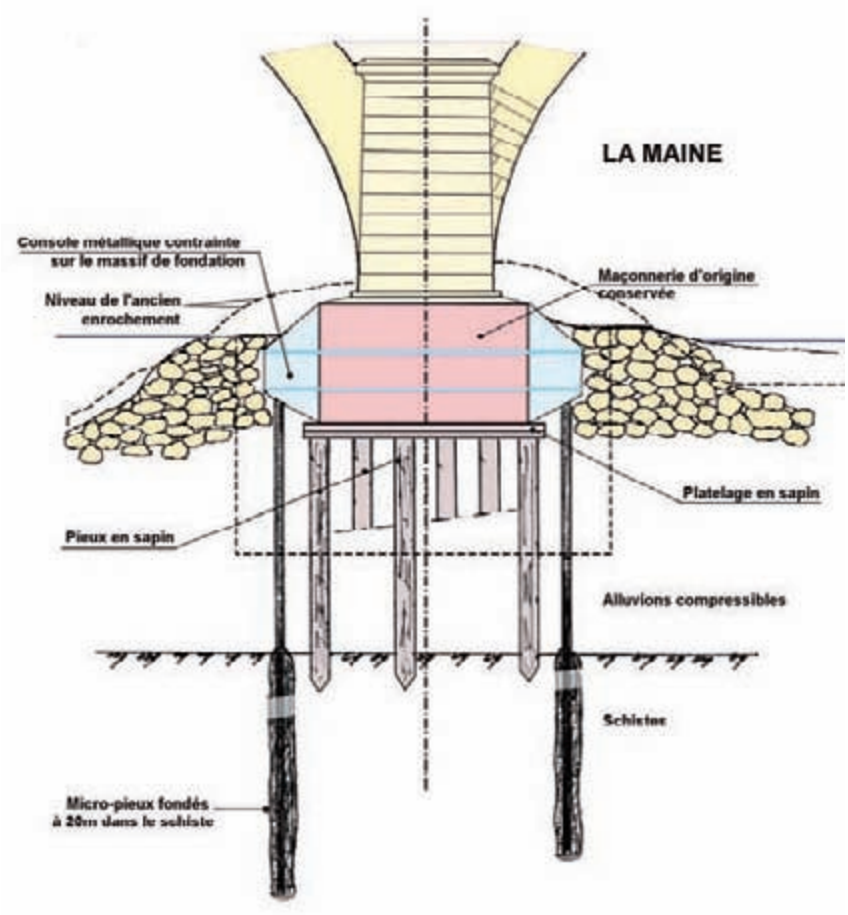



***Figure n° 29 : reprise en sous-œuvre par micropieux d'une fondation sur pieux en bois***

**Les documents justifiant le renforcement des fondations** précisent les types de micropieux, donnent les dispositions constructives et des recommandations pour la mise en œuvre, fixent les contraintes admissibles et le nombre minimal d'essais de contrôle.

Les micropieux sont constitués de préférence de tubes métalliques type pétroliers. Les types II, III et IV sont recommandés pour réaliser les micropieux. **ATTENTION**, ces micropieux présentent une très faible inertie et une médiocre résistance aux sollicitations de flexion. Ils sont essentiellement conçus pour résister à des efforts normaux. Il faut donc rechercher un nombre de micropieux et une disposition géométrique tels que le torseur des actions à la base de l'appui soit équilibré uniquement par des efforts de compression (et traction) dans les micropieux. La résistance en flexion des micropieux sert à reprendre les efforts parasites inévitables et difficilement appréciables qui se produisent après transfert des charges sur la nouvelle fondation et les efforts locaux exercés par le sol sur leur longueur courante.

Avec des micropieux inclinés, il convient de se méfier des efforts parasites qui peuvent résulter des tassements des couches de sol traversées, par exemple en cas de battage à proximité immédiate de tels micropieux.

Dans tous les cas, il est nécessaire de mettre en œuvre des dispositions complémentaires pour protéger la nouvelle structure de l'action directe de l'eau en cas d'affouillement et garantir la pérennité des micropieux.

Les micropieux traversant des couches de très mauvaises caractéristiques mécaniques doivent être justifiés au flambement.

Avec des micropieux scellés dans la maçonnerie, le transfert des efforts s'effectue par cisaillement. Il y a mobilisation de l'adhérence entre les armatures et le mortier d'injection et il y a cisaillement entre le mortier et la maçonnerie. La longueur de scellement est en général déterminée par l'adhérence armature/mortier (de l'ordre de quelques centaines de kPa). Il y a lieu de s'assurer que la maçonnerie est apte à reprendre les efforts de cisaillement et d'envisager, si besoin est, un corsetage de celle-ci.

***Il y a lieu de rappeler*** *que la mise en œuvre d'une technique de renforcement des fondations doit être étudiée avec précision, en remettant en cause le projet et en s'interrogeant sur la validité et la nécessité de cette opération.*

**> L'appréciation de l'état d'un ouvrage est un problème difficile et ceci, d'autant que les informations tirées de la reconnaissance sont limitées. La prudence doit alors guider le choix des moyens mis en œuvre et la séquence des opérations. A cet égard, il est recommandé, selon les cas :**

- de reconstituer d'abord la continuité entre l'appui et le sol support en comblant les cavités existantes ;
- d'étayer les parties instables, voire de mettre les voûtes sur cintres provisoires ;
- de ceinturer les appuis fracturés.

Si la mise à sec de l'ouvrage est souvent possible et permet alors de conforter les fondations dans les meilleures conditions, certaines précautions sont de rigueur. Il faut au préalable apprécier les risques de tassements du sol de fondation (tassement de consolidation ou dû à l'augmentation des charges par suppression de la poussée d'Archimède) ou encore vérifier le non-entraînement des sols par de l'eau en charge derrière un appui. Les épaulements des digues doivent être réalisés soigneusement et il convient, en outre, de prévoir une remise en eau rapide face à une crue.

Le tirant d'air disponible sous les voûtes des petits ponts en maçonnerie est souvent très limité. Ceci complique la mise en œuvre des palplanches, d'autant que l'on doit rechercher à ne pas réduire le débouché sous l'ouvrage. Lorsque l'épaisseur des alluvions est faible, il suffit alors de réaliser une présouille. Cette dernière ne doit cependant être exécutée que sur une longueur limitée, le travail étant mené par plots à l'avancement pour ne pas diminuer la stabilité de la fondation. Le non respect de cette règle de bon sens s'est traduit il y a quelques années par le basculement et la ruine de deux ouvrages fondés superficiellement.

Signalons enfin que le fonçage de palplanches favorise toujours une réorganisation des sols pulvérulents et, par suite, occasionne des tassements. Ce phénomène, particulièrement marqué avec le vibrofonçage, est susceptible de provoquer des tassements d'appui importants lorsque la fondation n'est pas établie sur un horizon dur. En l'état actuel des connaissances, l'utilisation du battage apparaît préférable au vibrofonçage et au lançage au voisinage immédiat de fondations en état précaire. Cependant, le vibrofonçage à très haute fréquence apparaît également applicable sans entraîner des désordres. Ces travaux doivent n'être exécutés que sous une surveillance permanente de l'ouvrage.

Tout travail de reprise en sous-œuvre d'une fondation affaiblit momentanément les sols de fondation, que ce soit à la suite de forages dans les sols, d'incorporation de coulis de ciment, de terrassements locaux… En conséquence, les cadences d'exécution de ces travaux doivent être examinées avec précision et selon une procédure détaillée analysant les conséquences de chacune des opérations.

La rédaction du **marché** doit présenter explicitement **ces contraintes** afin que les entreprises puissent formuler leurs prix en toute connaissance de cause et en fonction des cadences compatibles avec la sécurité. Ce facteur **"cadence"** explique en partie les coûts plus élevés de ces interventions par comparaison aux travaux neufs.

*Les questions de sécurité et de qualité d'exécution doivent primer sur la seule recherche de la vitesse de réalisation des travaux.*

# 2.17 Réception des travaux (pour mémoire)



**Se reporter au paragraphe 5.11 du guide FABEM 6.1.**

# 3

# Renforcement structural des maçonneries par injection


3.1 Définitions
3.2 Domaine d'application
3.3 Documents de référence
3.4 Études préalables à une injection
3.5 Matériels à utiliser
3.6 Préparation et exécution des travaux
3.7 Essais et contrôles
3.8 Travaux de finition
3.9 Réception des travaux (pour mémoire)

# 3.1 Définitions

- **suspension instable :** mélange d'eau, de ciment (avec ajout éventuel de fillers, de charges, de sable très fin…) homogène et stable pendant le malaxage et l'injection (dans certaines conditions) mais qui décante au repos ;

- **suspension stable :** mélange d'eau, de ciment (avec ajout éventuel de fillers, de charges, de sable très fin…), que les divers matériaux ou produits ajoutés (argile, bentonite, silicate de soude, plastifiants, fluidifiants…) rendent homogène et stable (aucune décantation) pendant plusieurs heures ;

- **injection de régénération :** injection interne ayant pour but de reconstituer l'homogénéité de la maçonnerie en régénérant le mortier de hourdage plus ou moins désagrégé ;

- **injection des vides d'interfaces (injection dite de «collage») :** injection ayant pour but de reconstituer le contact entre la maçonnerie et le terrain encaissant et de limiter les circulations d'eau…

L'injection, comme toutes les techniques de réparation d'ouvrage d'art, doit être considérée comme une alternative à la démolition reconstruction.

Le choix est, la plupart du temps, dicté par des considérations économiques, mais, pour les constructions en maçonnerie, il peut également être imposé pour la conservation d'un ouvrage ancien pour ses qualités esthétique ou sa valeur patrimoniale.

Les techniques d'injection permettent d'améliorer les caractéristiques des ouvrages par régénération interne des mortiers, par collage des parties d'ouvrage désolidarisées ou par amélioration de l'étanchéité.

**> Les modes opératoires devront être déclinés selon :**

- le type d'ouvrage (pont, mur de soutènement, tunnel....) ;
- les parties d'ouvrage (voûte, tympan, piédroit, massif de fondation....) ;
- la qualité ou l'état de la maçonnerie (forte décohésion....) ;
- les sollicitations mécaniques à reprendre.

L'injection peut donc répondre aux nombreux problèmes déterminés par le type d'ouvrage, la pathologie, le contexte économique et le contexte environnemental.

**> Cas d'une injection interne de régénération de la maçonnerie :**

Un ouvrage en maçonnerie est le plus souvent hétérogène : les parements sont constitués par des pierres de taille ou des moellons d'appareils, mais le cœur de la maçonnerie est constitué de moellons ordinaires et de «garnis» (éclats de pierres) noyés dans le mortier de hourdage. Lorsque la maçonnerie est fissurée, les joints détériorés, la chape inefficace..., l'eau va s'infiltrer, dissoudre le liant (la chaux), détruire le mortier, entraîner les éléments fins, permettre au gel de causer des dégâts... Il est alors nécessaire de reconstituer l'homogénéité du cœur de la maçonnerie par une **injection interne d'un coulis.** Cependant, il est parfois nécessaire de procéder à **une démolition reconstruction** lorsque les désordres sont structurellement importants.

**> Cas d'une injection des vides d'interfaces :**

Des vides continus ou isolées peuvent exister entre une maçonnerie et le terrain encaissant. Ces vides concernent surtout les ouvrages souterrains, mais aussi les voûtes en maçonnerie surmontées d'une épaisseur de remblais importante, les fondations sur massif en gros béton (défauts de contact entre le massif et son terrain d'assise)... Il est alors nécessaire de réaliser une injection de ces vides qui est appelée couramment **«injection de collage»,** bien que cela ne soit pas son but, d'autant que les coulis employés présentent un certain retrait. Ce terme

est issu des travaux de **l'AFTES** (se reporter aux **recommandations n° 146 de 1998** visées ci-après). Ces injections peuvent également avoir pour but de limiter les circulations d'eau éventuelles entre la maçonnerie et le terrain, circulation qui entraînent les fines et dissolvent les liants. Elles peuvent aussi être utilisées pour régénérer la maçonnerie en pénétrant par les joints situés au contact du terrain encaissant.

L'application de **ces techniques de régénération ou de collage** ne peut se faire qu'après une **étude complète de la maçonnerie** à réparer qui permet d'évaluer les désordres et d'en déduire la nature de l'injection à mettre en œuvre.

- **NF P 95-107 :** Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des maçonneries – Spécifications relatives aux techniques et aux matériaux utilisés ;
- **guide STRRES FABEM 3 :** Traitement des fissures par injection ;
- **guides du CETMEF :**
  - Confortement par injection des fondations d'ouvrages d'art (octobre 1986),
  - Auscultation, surveillance et entretien des ouvrages maritimes – Fascicule 1 les ouvrages en maçonnerie (août 1994),
  - Pathologie des ouvrages portuaires – Méthodes d'investigation (septembre 2008),
  - Barrage de Montaubry : étanchement de la digue par injection (investigations, injections et contrôles) (janvier 2006);
- **guide LCPC-SETRA :** Surveillance et confortement des fondations de ponts en site aquatique en état précaire (décembre 1980);
- **fascicule 68 DU CCTG :** Exécution des travaux de fondation des ouvrages de génie civil ;
- **AFTES :** recommandations n°146 de 1998 : l'emploi des injections pour la réhabilitation d'ouvrages souterrains visitables ;
- **manuel de H. Cambefort :** Injection des sols (éditions Eyrolles 1964).

## 3.4.1 INVESTIGATIONS

La décision d'injecter une maçonnerie est formulée lors des **études préalables au lancement de la consultation.** L'étude porte sur **la constitution et l'état de détérioration de la maçonnerie,** le calcul des descentes de charges, l'état des fondations etc.

**> Cette étude peut comprendre les opérations suivantes :**

- un relevé des désordres (emplacement, direction et ouvertures des fissures, emplacement et importance des déformations…) ;
- des carottages, des ouvertures de fenêtres, des prélèvements avec, éventuellement, un examen endoscopique, peuvent être nécessaires à la détermination de la constitution de la maçonnerie ;
- la détection des vides peut être effectuée au moyen d'une auscultation à l'aide d'un radar géologique (géoradar).

Pour s'assurer que les vides internes sont communicants, donc facilement injectables, il est possible de faire **un essai de perméabilité[6] à l'eau sous une charge variable des forages.** Par exemple, le contrôle se fait à l'aide d'un tube à manchette équipé d'une capsule pressiomètrique pour mesurer la perte de charge d'une colonne d'eau à l'origine de 1 m. Un enregistreur XY permet de contrôler si la perte de charge en fonction du temps est brutale (présence de vides dans la maçonnerie) ou si la perte de charge est proportionnelle à la capillarité de la maçonnerie. La chute de pression indique le débit d'eau qui pénètre dans la maçonnerie (pierres et joints) pendant un temps donné.

**Les photos 25 et 26 ci-après** présentent le tube à manchette équipé du capteur de pression et l'enregistreur X Y. Cet essai est également utilisé pour le contrôle de l'efficacité d'une injection.

La détermination de la nature et de l'origine des pierres naturelles fait appel à la **pétrographie**.

Des essais non destructifs, comme **l'auscultation sonique** (mesure de la vitesse de propagation du son simple ou sous forme de tomographie sismique) permettent de détecter les zones d'iso-vitesse qui ont donc des caractéristiques homogènes.

Ces mesures sont associées, selon les cas, à des essais mécaniques destructifs (mesure en place de la résistance à la rupture, du module d'élasticité statique, d'essais d'ancrage etc.) qui aident à apprécier son état de cohésion.

**L'essai d'ancrage** est illustré par les deux figures ci-après. Pour une paroi d'une épaisseur «e» de 0,80 m à 1,00 m, la profondeur à donner au forage de l'essai est de l'ordre de 1/2 à 2/3 de l'épaisseur de la paroi.

L'interprétation de l'essai se fait en mesurant l'angle du cône de rupture. Plus cet angle est petit, meilleure est la résistance de la maçonnerie. Un angle de 45° correspond à une cohésion moyenne de la maçonnerie.

*6 Rappel : la perméabilité est la propriété pour un matériau de se laisser traverser par l'eau. La capillarité est la propriété pour un matériau d'absorber l'eau avec laquelle il est en contact.*

Sur le chantier, ces **deux essais de détermination de la cohésion de la maçonnerie** sont réalisés avant et après l'injection lors d'une **épreuve de convenance.**

Avant consolidation, lorsque la maçonnerie comprend de gros vides, fissures, lézardes, il y a peu de jonction entre les matériaux entre eux, la vitesse du son peut-être nulle. L'état initial de décohésion est donc parfaitement défini dans ce cas.

**> Les pierres, briques anciennes et les mortiers subissent avec le temps des pertes de résistance ainsi que certaines pathologies. Les caractéristiques à étudier portent :**

- sur les pierres ou les briques seules (saturées en eau ou non, car la présence d'eau à l'intérieur des matériaux réduit leur résistance) en détectant leurs pathologies éventuelles, causées, par exemple, par des fissurations qui permettent la pénétration des agents pathogènes (analyse, microscope électronique à balayage **(MEB)**...) ;
- le mortier seul, pour lequel il faut déterminer sa composition chimique (analyses) et ses pathologies éventuelles causées par des agents agressifs tels que les chlorures et sulfates;
- la maçonnerie, sur des prélèvements intacts pour mesurer sa résistance...

La mesure de la porosité porte, en général, sur la **porosité ouverte** (ou libre) sachant qu'il existe des vides non communicants avec l'extérieur mesurés par la **porosité fermée** (ou piégée). L'ensemble des deux porosités est la **porosité totale.**

***REMARQUE :*** *il faut savoir que les essais ne permettent pas toujours de détecter tous les désordres recherchés. Pour limiter au maximum les déconvenues, les conseils d'un spécialiste «pointu» sont à rechercher pour le choix des essais à effectuer ainsi que pour leur interprétation. Il est conseillé de faire deux phases d'investigations. Une première phase pour situer les problèmes et une seconde phase pour les approfondir.*

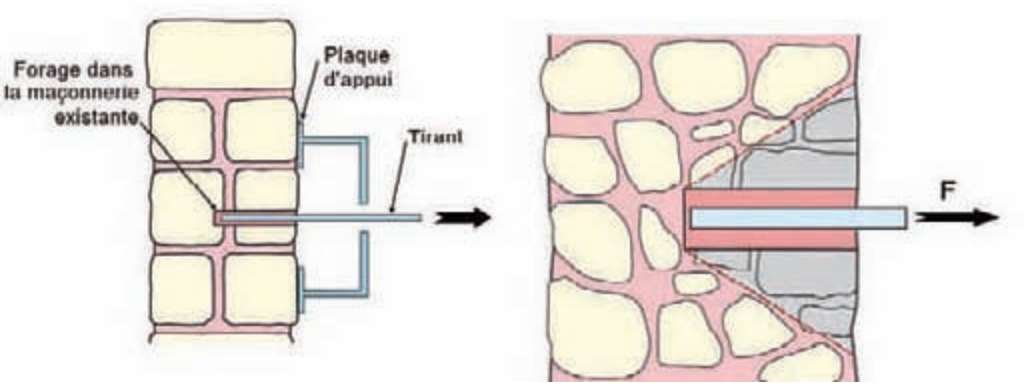



***Figure n° 30 : principe de l'essai d'ancrage***

> **De plus, des mesures de déformations, basculements, ouvertures des fissures à court terme de la maçonnerie peuvent permettre de préciser l'évolution de ces mouvements. Par exemple, il est possible d'utiliser :**

- pour les déformations : les extensomètres, les distancemètres électro-optiques, à fil invar ou infrarouge… ;
- pour des rotations et basculements : les inclinomètres, les clinomètres (rotation d'une section), les pendules inversés ou non… ;
- pour les tassements : un suivi topographique… ;
- pour les ouvertures de fissures : des témoins simples, des clameaux ou assimilés (déplacements bi ou tridimensionnels) ; les capteurs électriques… ;
- pour les contraintes (murs, piles) : la libération de contraintes (méthode rarement utilisée sinon dans le domaine du bâtiment et des monuments historiques).

Cette étude définira s'il est nécessaire d'appliquer un ou plusieurs produits d'injection (par exemple un simple coulis de ciment stabilisé pour colmater les gros vides et une injection d'un produit très fluide [ciment ultrafin, appelé aussi surbroyé] pour imprégner le mortier de hourdage…).

Ces investigations ont également pour but de déterminer **la ou les méthodes de nettoyage ou de préparation de surface** préalable(s) à la réalisation de l'injection.

## 3.4.2 CHOIX DES PRODUITS D'INJECTION ÉPREUVE D'ÉTUDE

> **Paramètre pouvant et devant être maitrisé par l'entreprise : le choix de la composition du coulis :**

- liants :
  - ciment,
  - chaux,
  - résines ;
- charges ;
- adjuvants ;
- eau.

## 3.4.2.1 Composants des coulis

**> Le ou les composants pouvant être utilisés dans les coulis d'injection des maçonneries sont :**

- les liants hydrauliques (chaux hydraulique, ciments [dimension maximale des grains ≤ 100 Ìm], ciments tamisés [dimension maximale des grains ≤ 12 µm], ciments surbroyés [dimension maximale des grains ≤ 12 µm]) ;
- la chaux aérienne ;
- le plâtre (**ATTENTION**, le plâtre est incompatible avec les liants hydrauliques ! Le plâtre concerne les maçonneries hourdées au plâtre) ;
- les fillers (calcaire, silicaux ….) ;
- les charges ultrafines (bentonite, fumée de silice…) ;
- les charges pouzzolaniques (naturelle, micro-silice…) ;
- les adjuvants (plastifiant, super plastifiant, entraîneur d'air…) ;
- l'eau (**NF EN 1008** : Eau de gâchage pour bétons – Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi) ;
- les résines organiques (époxydes, polyuréthanes, acryliques…).

Normalement, **il est préférable de ne pas injecter avec des résines** à cause de leur coefficient de dilatation élevé. De plus, en dessous de 8°C, les époxydes ne polymérisent pas et les méthacrylates de la famille des acrylamides posent des problèmes en présence d'humidité. Il est nettement préférable d'utiliser des **ciments ultrafins (surbroyés)** avec un accélérateur de prise.

***ATTENTION,*** *il faut s'assurer que les composants utilisés ne présentent pas* ***d'incompatibilités*** *avec les pierres ou les briques, ce qui pourrait entraîner l'apparition d'efflorescences, etc. Se reporter au paragraphe 4.3.6 du guide FABEM 6.1 qui traite des incompatibilités (rappel : pour les maçonneries de briques, il est fortement recommandé d'utiliser des ciments à faible teneur en C3A).*

## 3.4.2.2 Choix de la composition des coulis

Les produits d'injection prêts à l'emploi permettent de s'affranchir de **l'épreuve d'étude** du coulis d'injection.

**> Ces produits d'injection doivent posséder les qualités suivantes :**

- une facilité d'injection quel que soit le type de coulis ;
- un faible retrait et une faible décantation ;
- une bonne injectabilité **sous faible pression** pour éviter des désordres dans la maçonnerie;
- une stabilité de leurs caractéristiques dans le temps après injection.

La résistance mécanique du produit d'injection doit être adaptée à la résistance de la maçonnerie pour ne pas créer de points durs.

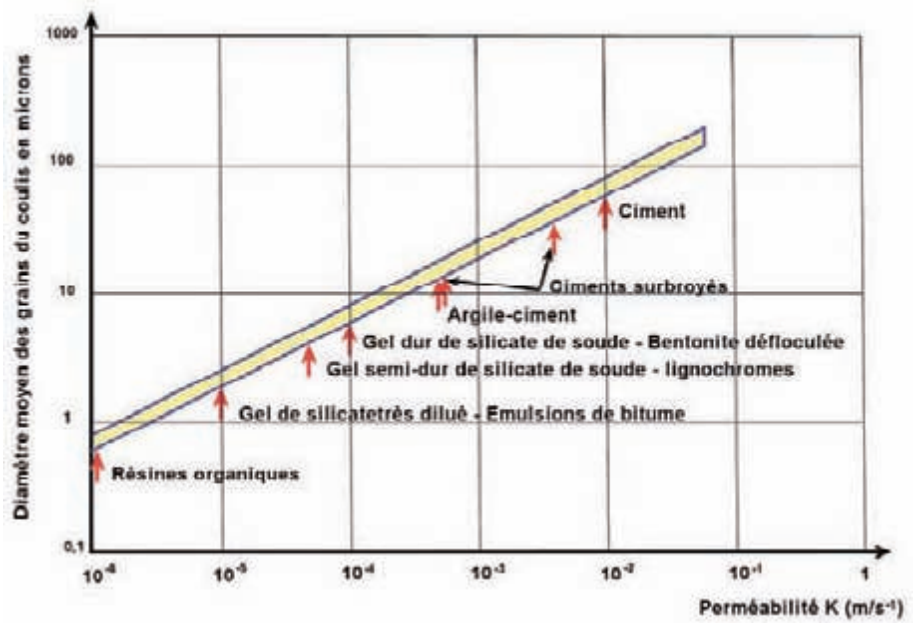



***Figure n° 31 : limites d'injectabilité des coulis en fonction de la perméabilité des terrains***

Le graphique ci-devant (tiré du document susvisé de **Cambefort (1977)** et complété pour ce qui concerne les ciments surbroyés) donne les limites de pénétrabilité des coulis en fonction de la perméabilité des terrains. Son application aux maçonneries permet de fixer les limites d'injectabilité des coulis d'argiles-ciments ultra fins (surbroyés) présentant des diamètres de grains de 1 à 12 microns à un milieu présentant une perméabilité de l'ordre de $10^{-5}$ $m.s^{-1}$.

Dans la pratique, ces limites de pénétrabilité peuvent être abaissées en adoptant de faibles cadences d'incorporation des coulis de l'ordre 150 l/h à moins de 50 l/h. En effet, les valeurs de débits adoptées lors des injections des sols et qui ont servi à établir les limites de pénétrabilité données par le graphique ci-dessus, sont très supérieures aux valeurs de débits susvisées[7].

Le tableau ci-après donne les limites d'injectabilité des produits d'injection à base des liants les plus courants (fluidité).

| COULIS | Type de sol | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | gravier | sable | | | silt |
| | | grossier | fin | ultra fin | |
| ciment | - - - - - - - - - - - - - - - - - | | | | |
| ciment surbroyé | - - - - - - - - - - - - - - - - -

**> Coefficient de perméabilité :**

- cas d'un milieu très faiblement perméable : $10^{-4}$ m.s$^{-1}$ ;
- cas d'un milieu faiblement perméable : $10^{-3}$ m.s$^{-1}$.

*Une maçonnerie dont le coefficient de perméabilité est inférieur à $10^{-6}$ ($10^{-7}$ ou $10^{-8}$) est non injectable.*

**> Ordre de grandeur du coefficient de perméabilité de quelques matériaux :**

- gravillons : $10^{-1}$ m.s$^{-1}$ à $10^{-2}$ m.s$^{-1}$ ;
- sables : $10^{-2}$ m.s$^{-1}$ à $10^{-5}$ m.s$^{-1}$ ;
- sables argileux et silts : $10^{-5}$ m.s$^{-1}$ à $10^{-9}$ m.s$^{-1}$ ;
- calcaire fissuré : < $10^{-5}$ m.s$^{-1}$

La composition des coulis doit répondre de manière spécifique à chaque cas : état de cohésion, grosseur des vides, charges auxquelles est soumise la maçonnerie. Dans ce but, **l'épreuve d'étude** a pour objet de vérifier que la formule nominale proposée à l'acceptation du **maître d'œuvre** permet de satisfaire aux exigences des spécifications. Elle est effectuée avec des moyens de laboratoire, en tenant compte des paramètres propres aux chantiers, sur la base d'essais portant sur les caractères spécifiés, comme l'essai à la colonne de sable décrit dans la suite du paragraphe.

**> Cas des coulis d'injection interne de régénération de la maçonnerie :**

- si le mortier de hourdage est fortement désorganisé avec des vides communicants, l'injection d'un coulis instable ou stable à base de liants hydrauliques permet de résoudre le problème ;
- si le sable du mortier est resté en place (il faut utiliser les techniques d'injection des sols pulvérulents fins à très fins en tenant compte, cependant, qu'il s'agit d'une maçonnerie qui ne peut supporter des pressions importantes), il faut avoir recours à des injections à base de coulis stables devant, dans les cas extrêmes, avoir une viscosité proche de celle de l'eau comme les coulis à base de résines organiques…
- si la maçonnerie présente des fissures, deux cas se présentent :
  - une réparation structurelle est nécessaire ; dans ce cas, il faut injecter un coulis stable ou instable à base de liants hydrauliques qui, après prise, redonne à la maçonnerie sa résistance pour mettre en œuvre la réparation,
  - la réparation structurelle n'est pas nécessaire (fissures jouant le rôle d'un joint de dilatation ou de fractionnement) ; dans ce cas, il faut injecter la fissure avec un produit résistant mais présentant une certaine souplesse pour éviter la réouverture des fissures.

Si le but de l'injection est de régénérer un mortier de hourdage désagrégé dont le squelette est encore présent, **une très bonne injectabilité du coulis** est indispensable. La faible viscosité est généralement obtenue grâce à un coulis à base de ciment dont le rapport C/E = 1. La résistance d'un tel coulis, après durcissement, varie de 10 à 15 MPa, valeur amplement suffisante pour retrouver celle d'un ancien mortier de pose.

La stabilisation par de la bentonite, qui a pour inconvénient une augmentation de la viscosité, n'est pas nécessaire, sauf si une étanchéité absolue est recherchée. En effet, le remplissage à 100% des vides intergranulaires n'est pas indispensable pour reconstituer un ancien mortier.

En revanche, si la perméabilité du mortier à reconstituer est inférieure à $1.10^{-3}$ $m/s^{-1}$ (sable très fin ou colmatage du squelette par des fines), il peut être nécessaire d'utiliser un ciment ultrafin (surbroyé) de type SPINOR A 12 ou équivalent (grains ≤ 12 µm). En cas de perméabilité plus faible, des coulis à base de liants organiques deviennent nécessaires.

Si de gros vides sont à injecter, ainsi que de petits interstices entre les pierres, il faut étudier deux sortes de coulis. Par exemple, un coulis à base de ciment stabilisé à injecter en premier, puis un coulis très fluide à base de ciment ultrafin (surbroyé).

**> Cas des coulis dits de collage (se référer à la recommandation de l'AFTES susvisée) :**

Pour combler les vides communicants, **des coulis de ciments courants,** éventuellement chargés en sable et/ou en additions à bas prix (lorsque les vides sont importants), sont injectés par des forages traversant les maçonneries (de l'ordre de 1 trou pour 4 $m^2$).

Pour ces coulis de «collage pur», c'est-à-dire ceux dont le rôle unique est de recréer la butée du terrain dans le plan de la face non-vue de la maçonnerie, la résistance à la compression n'a besoin que d'être au moins égale à celle du terrain en place. Cette résistance est généralement inférieure à 0.5 MPa et les résistances requises pour les coulis peuvent aller de 1 à 3 MPa.

**> Cas des surfaces non-horizontales (par exemple, extrados et piédroits de souterrains):**

Une légère décantation (< 5%) est acceptable ; en effet, la surface de contact peut être, dans ce cas, améliorée de près de 95% par l'injection et ce, malgré la décantation.

**> Cas des surfaces horizontales (par exemple, assise de fondation) :**

Dans ce cas, en effet, la moindre décantation provoque un vide, plus faible certes que l'ancien, mais régnant sur 100% de la surface où la fondation n'était pas au contact du terrain. L'emploi d'un coulis stabilisé, généralement par de la bentonite, devient alors obligatoire.

Pour les ouvrages en maçonnerie, traités dans ce paragraphe, les joints peuvent être profondément dégradés ou même disparus sur la face non-vue (appelée extrados pour les ouvrages souterrains). Dans ce cas, le coulis de collage pénètre dans les joints en produisant une régénération de la maçonnerie, à condition toutefois que sa résistance en compression et son injectabilité soient suffisantes.

Il peut donc être très intéressant de prévoir un coulis de collage de résistance nettement plus élevée que celle qui serait suffisante pour améliorer la butée, de manière à créer, en plus et pour un coût bien moindre que celui d'une injection interne, un "effet de régénération" de la maçonnerie.

### > Exemple d'études de compositions de coulis de régénération et de collage :

Le premier tableau ci-après montre l'importance de l'adjuvant qui peut modifier fortement les caractéristiques du coulis frais (viscosité et exsudation).

| Type de coulis | Type de ciment | Classe du ciment | Dosages | | | | | | | | | Caractéristiques du coulis frais | | | Caractéristiques du coulis durci | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ciment | Sable | Filler | Cendre | Fumée de silice | Bentonite | Adjuvant | Eau | Rapport C/E | Densité | Viscosité cône Marsh 4,76 mm (secondes) | Exsudation à 2h/24h | Densité | fc7 (MPa) | fc 28 (MPa) |
| Non stabilisé n°1 | CEM II | 32,5 | | | | | | | | | 2/1 | 1,8 | 87 s | < 3% /3% | | | |
| Non stabilisé n°2 | | | | | | | | | | | 1/1 | 1,5 | 32 s | 23% /25% | | | |
| Stabilisé n°1-a | CEM II | 32,5 | | | | | | | Adj 1 | | 2/1 | 1,72 | 50 | 1%/ 7,5% | | | |
| Stabilisé n°1-b | CEM II | 32,5 | | | | | | | Adj 2 | | 2/1 | 1,8 | 49 | 2%/ 4% | | | |
| Stabilisé n°1-c | CEM II | 32,5 | | | | | | | Adj 3 | | 2/1 | 1,78 | 49 | 1%/ 1% | | | |
| Stabilisé n°2-a | | | | | | | | 3% | | | 1/1 | 1,51 | 69 | 1%/ 1% | | | |
| Stabilisé n°2-b | | | | | | | | 3% | Adj n°2 | | 2/1 | 1,53 | 38 | 1%/ 1% | | | |
| Stabilisé | Surbroyé | 52,5 | 800 | | | | Oui | | 16 | 702 | 1,14/1 | 1,51 | 39 | 2% | 1,61 | 24,5 | 29,7 |
| Stabilisé | CEM III | 32,5 | 700 | | | | | 25 | 14 | 741 | 0,94/1 | 1,52 | 35 | 2% | 1,54 | 12,73 | 25,13 |
| Stabilisé | Surbroyé | 52,5 | 412 | | | | | | 6 | 823 | 0,50/1 | 1,24 | | | | | 6,6±2,5 |
| Stabilisé | Surbroyé | 52,5 | 536 | | | | | | 16,6 | 804,6 | 0,67/1 | | 27 | <5 | | | |

***Tableau n° 5 : exemples de coulis stabilisés et non stabilisés de régénération***

| Type de coulis | Type de ciment | Classe du ciment | Dosages | | | | | | | | | Caractéristiques du coulis frais | | | Caractéristiques du coulis durci | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ciment | Sable | Filler | Cendre | Fumée de silice | Bentonite | Adjuvant | Eau | Rapport C/E | Densité | Viscosité cône Marsh 4,76 mm (secondes) | Exsudation à 2h/ 24h | Densité | fc7 (MPa) | fc 28 (MPa) |
| Stabilisé | CEM III | 32,5 | 604 | | | | | 30 | | 785 | 0,77/1 | 1,49 | 39 | 2% | 1,49 | 2,00 | 7,50 |
| Stabilisé | CEM III | 32,5 | 906 | | | | | 8 | | 936 | 0,97/1 | 1,65 | 38 | 1,5% | 1,69 | 4,80 | 12,80 |

***Tableau n° 6 : exemple de coulis de collage***

**> Paramètre pouvant et devant être maitrisé par l'entreprise : le matériel de fabrication du coulis :**

- la fabrication peut être entièrement automatisée avec :
  - un dosage pondéral pour les matériaux livrés en vrac (le malaxeur peut être monté sur des pesons qui arrêtent automatiquement la vis ou le tapis),
  - un dosage volumétrique pour l'eau ;
- pour les petits chantiers de confortement, la fabrication est encore fortement manuelle avec :
  - un dosage au sac pour les constituants,
  - un dosage volumétrique pour l'eau par cuve graduée.
- la centrale d'injection comporte :
  - un malaxeur à haute turbulence,
  - un bac de reprise (ou mélangeur) pour pouvoir injecter en continu et maintenir le coulis en suspension.

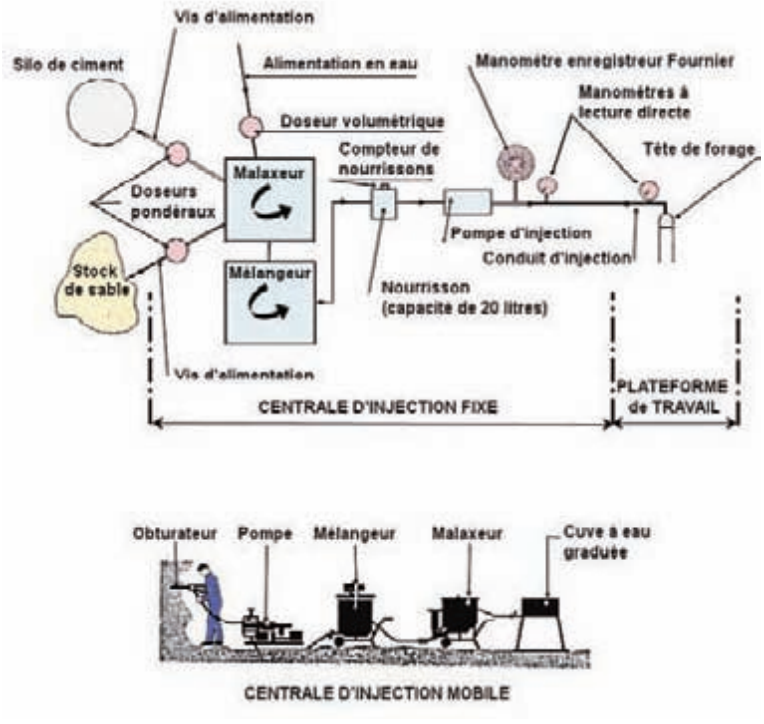



*Figure n° 32 : schémas de centrales d'injection*

Pour les coulis de ciment, il est nécessaire d'utiliser **un malaxeur à haute turbulence** (1500 à 3000 tours/minute). En effet, la mise en suspension des grains de ciment nécessite des fortes vitesses de rotation (1500 tours/ mn au minimum), surtout pour la fabrication de coulis avec bentonite.

La photo ci-après présente un malaxeur à haute turbulence en arrière-plan, équipé d'un manomètre basse pression (0 à 0,5 MPa) et d'un compteur totalisateur permettant de contrôler le volume injecté de coulis.

***Photo n° 18 : système malaxeur et mélangeur*** *(crédit photo Chemgroot )*

**> Paramètre pouvant et devant être maitrisé par l'entreprise : le matériel de forage et sa mise en œuvre :**

- le maillage ;
- la profondeur de forage ;
- le diamètre de forage ;
- l'équipement du forage ;
- le forage nu :
  - gainage PVC,
  - tube à manchettes (injection répétitive et sélective, dite IRS[8]),
  - lance d'injection,
  - obturateur simple ;
- le choix de la pression d'injection ;
- le choix du débit d'injection.

[8] *Une injection IRS comporte deux phases : une première injection, qui peut être effectuée à l'aide d'un système granitaire ou par le tube à manchettes, suivie, quelques heures après, d'une réinjection, soit en utilisant un obturateur simple, soit en utilisant un obturateur double pour faire cette réinjection manchette par manchette..*

**> Paramètre pouvant et devant être maitrisé par l'entreprise : les pompes d'injection (transport du coulis) et leur mise en œuvre :**

Parmi les **quatre types principaux de pompes existants**, le choix doit se faire en fonction des débits et des pressions nécessaires comme suit :

- **les pompes à pistons** permettent de fortes pressions mais occasionnent des coups de bélier qui sont partiellement diminués par des amortisseurs. Ce matériel est plus adapté au traitement de terrain nécessitant des fortes pressions pour le claquage.

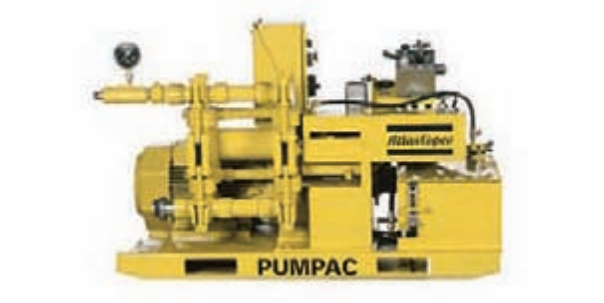



***Photo n° 19 : pompe à pistons*** *(crédit photo Atlas Copco)*

- **les pompes à membranes,** peu utilisées, ont l'avantage d'avoir un fonctionnement simple et d'être très compactes, ce qui est intéressant pour de petites interventions comme des scellements d'ancrages.

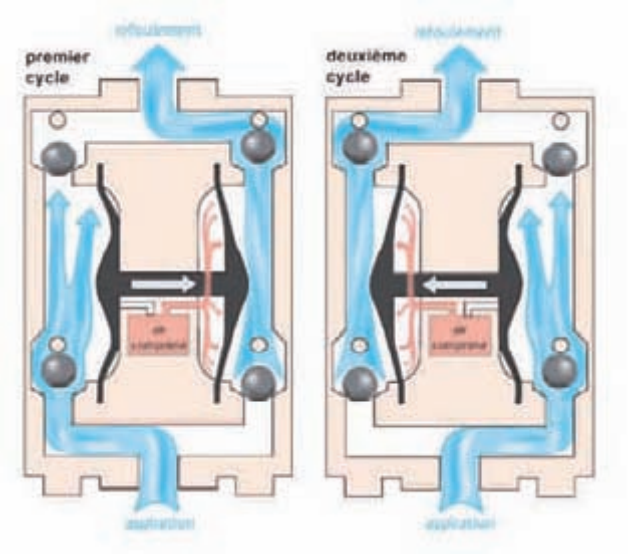



***Photo n° 20 : principe de fonctionnement d'une pompe à membrane*** *(crédit photo Tapflo )*

- **les pompes à vis** sont très adaptées à l'injection de régénération par leur facilité de réglage, leur débit régulier et continu et leur fonctionnement à faible pression.

***Photo n° 21 : pompe à vis*** *(crédit photo PCM)*

- **les pompes péristaltiques** sont moins utilisées que les pompes à vis ; cependant, elles présentent les mêmes avantages.

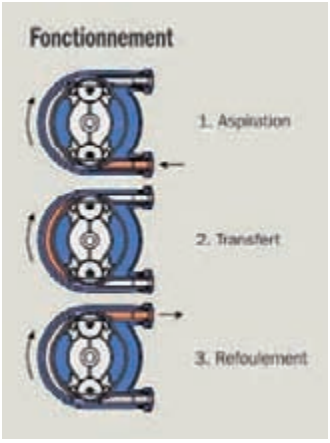



***Photo n° 22 : pompe péristaltique*** *(crédit photo PCM)*

**> L'amenée du coulis de la centrale au site d'injection se fait par une conduite d'injection qui doit être adaptée au débit et à la pression d'injection :**

- pour les pompes à piston, un flexible HP armé doit être utilisé pour éviter les risques d'éclatement ;
- pour les faibles pressions, tous les types de tuyaux peuvent être utilisés (métalliques, caoutchouc, polyéthylène…), sous réserves de résister à la pression maximum de la pompes.

Le diamètre de la conduite doit permettre une vitesse de déplacement suffisante pour éviter la décantation dans la conduite et la création de bouchon, surtout dans le cas d'utilisation de coulis instable.

**> Le matériel doit permettre de régler et de contrôler chaque point d'injection. Les informations obtenues doivent être enregistrées en continu sur un graphique qui fournit :**

- la pression et le débit avec le cumul des quantités injectées ;
- les dépassements de la pression limite, laquelle est contrôlée par un limitateur de pression. Le réglage du limitateur doit tenir compte de la perte de charge entre la pompe et la lance d'injection.

Les pompes à vis ou péristaltiques permettent de régler aisément le débit et la pression. Elles doivent donc être préférées aux pompes à piston.

Se reporter au **guide FABEM 3.**

***Photo n° 23 : centrale d'injection*** *(crédit photo A. Bouineau)*

***Rappel :*** *l'entrepreneur soumet à l'acceptation du maître d'œuvre le matériel et le procédé d'exécution de l'injection dans le cadre de la procédure d'injection.*

## 3.6.1 PRÉPARATION DE LA MAÇONNERIE AVANT INJECTION

**Les dispositifs de drainage** doivent être bouchés provisoirement pendant toute l'injection. Ils sont débouchés et remis en état à la fin de l'opération, voire reconstitués entièrement si besoin est.

Il faut s'assurer de la qualité du parement. Si les joints ne sont pas bien réalisés, ils peuvent donner lieu à des fuites de coulis lors de l'opération d'injection. Soit ils sont rejointoyés, soit obturés au ciment prompt.

Si la maçonnerie est recouverte d'un enduit, celui-ci doit être adhérent et relativement imperméable à l'eau. Si la première condition n'est pas remplie, l'enduit pourra se décoller pendant l'injection. Si la seconde condition n'est pas satisfaite, le coulis ne restera pas dans la maçonnerie.

Il faut également vérifier qu'il n'existe pas de cavités ou des possibilités de fuite des parements en contact avec le sol. Une injection préalable du sol peut-être nécessaire.

## 3.6.2 ÉPREUVE DE CONVENANCE

**L'épreuve de convenance** est effectuée suffisamment longtemps avant le début des injections (au minimum vingt-quatre heures) pour pouvoir obtenir les résultats des essais imposés par le **marché.** Elle est exécutée sur le chantier et dans les conditions de celui-ci. Elle permet le réglage final des dosages des coulis et de la pression d'injection en fonction des paramètres du chantier.

La pression d'injection doit être étudiée avec soin. Une pression trop forte peut détruire la maçonnerie par déformation des parements sous l'effet de la poussée hydrostatique. Une pression trop faible ne permet pas au coulis de s'infiltrer dans les capillaires fins du mortier à consolider.

***Rappel :*** *un des principaux paramètres propres aux chantiers est l'état de cohésion de la maçonnerie qui est déterminée avant et après l'injection lors de* ***l'épreuve de convenance,*** *par exemple par la mesure de la vitesse de propagation du son ou par l'essai d'ancrage (destructif).*

**Les essais à effectuer** sont identiques à ceux de contrôle développés ci-après.

La levée du **POINT D'ARRÊT** est conditionnée par la validation, par le **maître d'œuvre,** de **l'épreuve de convenance.**

## 3.6.3 RÉALISATION DE L'INJECTION

La réalisation de l'injection tient compte des enseignements obtenus lors de **l'essai de convenance** (pression et débit).

Dans le cas où l'injection concerne aussi les sols de fondation, il faut commencer par les sols avant d'injecter la maçonnerie. Il faut faire une injection périphérique à maillage serré qui va permettre de créer un confinement favorable au remplissage de la zone centrale.

Pour l'injection du ou des coulis, des trous sont faits à espacements réguliers, en général en quinconce. Chaque trou doit être identifié sur un plan. Les évents sont mis en place. À titre indicatif, leur espacement est égal, au maximum, à l'épaisseur de la maçonnerie à consolider.

Les forages à l'eau peuvent provoquer des désordres dans la structure à cause de la pression de la colonne d'eau **(«du crève tonneau de Pascal»).** Ils peuvent aussi provoquer la dissolution des matériaux, en particulier, de la chaux. Le recours au **«Teepol ®»** comme fluide de forage est une solution qui évite la dissolution (le Teepol ®, produit classé non dangereux, est un détergeant sous forme d'une préparation liquide tensio-active).

Si la maçonnerie est désorganisée, prévoir un forage tubé, ce qui permet d'éviter de coincer l'outil de forage.

L'injection peut se faire, soit par gravité, soit sous faible pression. Une pression de l'ordre de 0,2 MPa est souvent suffisante. L'injection doit se faire à débit constant de valeur faible et inférieure à 150 l/h. Dans certaines zones de la maçonnerie des ponts, comme les voûtes, le débit peut descendre à 30 l/h sous une pression comprise entre 0,1 et 0,2 MPa. Il faut injecter par bandes d'environ 1 m de large de façon à limiter les risques d'éclatement de la maçonnerie, le coulis pouvant jouer le rôle de vérin.

L'injection se déroule niveau d'injecteurs par niveau d'injecteurs, en commençant par le niveau le plus bas. Il faut injecter de l'extérieur vers l'intérieur de l'élément à traiter. Prévoir une alimentation en tête si l'injection a pour but de remplir une cavité mais limiter la longueur du forage à environ 5 m. Si la maçonnerie est désorganisée, prévoir une injection avec un tube crépiné.

**Dans les parties immergées,** il faut essayer des stopper les arrivées d'eau, soit par rabattement, soit en faisant mastiquer les joints par des scaphandriers, tout en prévoyant des évents d'évacuation de l'eau interne à la maçonnerie.

Dans le cas où l'on injecte deux coulis, on commence par le coulis le moins fluide (par exemple le coulis de ciment stabilisé), afin de remplir les gros vides et on termine par un coulis fluide, par exemple un coulis de résine qui va imprégner le mortier de pose.

Le bon déroulement de l'injection passe par l'enregistrement de la quantité de produit injecté et de la mesure en continu de la pression d'injection, du bon fonctionnement des évents, de l'examen de la zone injectée et de l'ouvrage (fuite ou déformations).

**> L'injection doit être stoppée lorsque :**

- le coulis apparaît au niveau d'un évent, ou il y a une résurgence (fuite de coulis) ;
- la quantité de coulis prévue est atteinte avant que l'injection ne soit terminée. Après la recherche des causes de ce problème et l'accord du **maître d'œuvre,** une injection complémentaire peut être entreprise ;
- la pression limite est dépassée pendant un laps de temps donné. La **procédure** fixe le dépassement de pression (~ 0,1 MPa) et le temps de dépassement (environ une dizaine de secondes).

**> Liste des essais sur coulis et matériaux :**

- fluidité au cône de Marsh : **XF P 18-358 et NF EN 14117;**
- stabilité (exsudation ou ressuage) : **XF P 18-359 ;**
- résistance mécanique : **XP P 18-360 ;**
- retrait : **XP P 18-361 ;**
- temps de prise : **XP P 18-362 ;**
- fausse prise : **XP P 18-363 ;**
- absorption capillaire : **XP P 18-364 ;**
- coefficient de capillarité : **NF EN 1925 : pierre naturelle ;**
- porosité ouverte : **NF EN 1936 pierre naturelle ;**
- injectabilité à la colonne de sable : **NF EN 1771.**

**> Les contrôles (types et nombre) fixés par le marché peuvent porter sur les points suivants :**

- la mesure du débit d'injection et du volume injecté. Selon l'importance du chantier le contrôle des volumes injectés peut se faire :
  - par un relevé manuel, injecteur par injecteur, mis au propre par l'entreprise en fin de journée,
  - ou par un enregistrement électronique des paramètres à l'aide de capteur de pression et de débit placée sur la conduite ;
- le relevé de la pression d'injection à l'entrée de la maçonnerie ;
- une vérification des caractéristiques du coulis (fluidité, injectabilité…), à l'entrée du coulis (injecteur) et à la sortie la plus éloigné (évent), sachant que l'injection commençant par le bas de la maçonnerie, l'évent devient à son tour injecteur et ainsi de suite… ;
- la fluidité à l'aide du cône de Marsh ;
- le contrôle de l'injectabilité du coulis à l'aide de l'essai à la colonne de sable de granulométrie spécifiée. Les valeurs ci-après sont indicatives :
  - pour un matériau de perméabilité $10^{-4}$ $m.s^{-1}$ : sable 0,1 à 0,3 mm,
  - pour un matériau de perméabilité $10^{-3}$ $m.s^{-1}$ : sable 0,2 à 1 mm,
- le retrait à 24 heures du coulis ;
- l'exsudation du coulis ;

- la résistance en compression du coulis ;
- la détermination du renforcement de la maçonnerie, par exemple à l'aide des mesures suivantes à sélectionner suivant le chantier :
  - mesure de la vitesse de propagation du son, en comparaison avec la valeur initiale (réduction de l'importance des zones à faible vitesse),
  - mesure de la perméabilité à l'eau sous une charge variable des forages (par exemple, un tube à manchette équipé d'une capsule pressiomètrique mesure la perte de charge d'une colonne d'eau à l'origine de 1 m). Un enregistreur X Y permet de contrôler si la perte de charge en fonction du temps est :
    - . brutale, ce qui indique qu'il reste des vides dans la maçonnerie, c'est donc une mauvaise injection,
    - . proportionnelle à la capillarité de la maçonnerie, c'est donc une bonne injection,

La chute de pression indique le débit d'eau qui pénètre dans la maçonnerie (pierres et joints) pendant un temps donné. Les deux photos 25 et 26 ci-après présentent le tube à manchette équipé du capteur de pression et l'enregistreur X Y.

- examen endoscopique à l'aide d'une caméra. En effet, l'interprétation d'une visée directe dans un endoscope est très délicate, alors que la lecture de l'imagerie numérique est relativement aisée,
- essais de chargements mécaniques réalisés in situ,
- tomographie sismique avant et après injection
- etc.

Les carottages après injection ne sont pas conseillés, car la prise des coulis est relativement longue. En effet, le rapport C/E des coulis varie entre 0,6 et 0,7, ce qui indique des coulis très dilués, donc à prise lente. Un carottage dans de telles conditions ne remonterait que des cailloux et on conclurait à une mauvaise injection ! Il faut attendre de l'ordre de 4 à 5 mois avant de procéder aux carottages. Le marché doit être rédigé en conséquence pour tenir compte d'un tel délai pour la réception des travaux.

***Photo n° 24 : détail d'un dispositif de mesure de la pression et du débit d'injection*** *(crédit photo DIMTI)*

***Photo n° 25 : tube à manchette équipé d'un capteur de pression*** *(crédit photo A. Bouineau)*

***Photo n° 26 enregistreur XY*** *(crédit photo A. Bouineau)*

**L'injectabilité à la colonne de sable** permet de reconstituer la perméabilité du milieu à injecter en faisant varier la granulométrie du sable lors d'un essai à l'eau (injection à débit constant avec mesure de la pression). Cet essai à l'eau mesure la perméabilité du mélange sableux. Ensuite, une seconde phase d'essais avec un ou plusieurs coulis permet de mesurer l'injectabilité de ces coulis afin de choisir le produit le plus performant.

**La photo ci-après** présente un essai comparatif d'injectabilité de deux coulis distincts sur deux colonnes de sable identiques. L'injectabilité à la colonne de sable est un essai technologique comparatif : le coulis passe ou ne passe pas.

***Photo n° 27 : essais avec deux colonnes de sable*** *(crédit photo A. Bouineau)*

**> Matériel courant de contrôle : les photos ci-après montrent des matériels de contrôle pour la mesure :**

- du débit et du volume à l'aide d'un enregistreur ;
- de la viscosité avec un cône de Marsh ;
- de la densité avec la balance de baroid ;
- de la décantation avec une éprouvette graduée ;
- de la résistance à la compression, réalisation d'éprouvettes cylindriques élancement 2 (par exemple de 40 mm de diamètre et de 80 mm de hauteur), par écrasement.

***Photo n° 28 : cône de Marsh*** *(crédit photo WIKIPEDIA)*

***Photo n° 29 : balance de baroid*** *(crédit photo Lab X)*

Les mesures pressions/quantités et les résultats des essais de contrôle, après interprétation, servent au **maître d'œuvre** pour réceptionner ou non les travaux d'injection.

# 3.8 Travaux de finition

Les coulures et projection de coulis doivent être nettoyées au fur à mesure des travaux pour éviter qu'elles ne s'incrustent. Dans certains cas, il peut être nécessaire de réaliser un nettoyage plus ou moins appuyé (léger sablage, brossage, passage du chemin de fer…) pour éliminer les fuites et coulures de coulis sur les parements.

**Se reporter au paragraphe 5.11 du guide FABEM 6.1.**

> ***Rappel,*** *lorsque les travaux concernent un* ***renforcement structural,*** *lors de la* ***réception des travaux,*** *il convient de s'assurer que le renforcement participe effectivement à la reprise des efforts.* ***Le marché*** *doit spécifier les essais à effectuer pour en apporter la preuve. Ces essais peuvent être proposés à l'acceptation du* ***maître d'œuvre*** *par* ***l'entrepreneur****.*

# 4 Réparation et/ou renforcement des structures en maçonnerie par broches, boulons d'ancrage et tirants d'enserrement


4.1 Généralités

4.2 Domaine d'application et conseils généraux

4.3 Types de désordres susceptibles de réparations et/ou renforcements par broches, boulons d'ancrage et tirants d'enserrement et choix de la technique à appliquer

4.4 Caractéristiques des boulons d'ancrage, broches tirants d'enserrement… et des produits et matériaux connexes

4.5 Matériels à utiliser

4.6 Préparation et réalisation de l'opération

4.7 Essais et contrôles

4.8 Réception des travaux

***> Rappel : le guide FAFO 1 relatif à la réparation et au renforcement des fondations traite :***

- ***des tirants d'ancrage :*** *ils sont constitués d'un ensemble de barres, de fils ou de torons en acier à haute résistance ancrés par scellement dans le sol sur une certaine longueur et libres sur le reste de leur longueur (entre la zone de scellement et la tête d'ancrage). Après la mise en tension des tirants, les parties libres reçoivent une protection. Ils relèvent des* ***recommandations TA 86, TA 95*** *et de la norme* ***NF EN 1537 ;***

- ***des clous :*** *ils sont intermédiaires entre les tirants d'ancrage et les boulons d'ancrage. Ils sont constitués de barres métalliques ou de fibres de verre scellées dans le sol ou de barres métalliques battues. Ils relèvent des* ***recommandations «Clouterre» ;***

- ***des boulons d'ancrage :*** *ils peuvent être passifs ou précontraints. Ils sont constitués par des barres métalliques de faible longueur et de faible puissance qui ont ancrées dans le sol :*

  *- soit ponctuellement par scellement ou par des coquilles expansives,*

  *- soit sur toute leur longueur par scellement ou par expansion du corps du boulon.*

***NOTA :*** *ces techniques peuvent être utilisées pour la réparation et le renforcement d'ouvrages (fondations, murs de soutènement, souterrains…). Pour d'autres ouvrages ou parties d'ouvrages, ces techniques ont été adaptées comme expliqué dans la suite du paragraphe.*

**Les tirants d'ancrage, les clous et les boulons d'ancrages** peuvent être utilisés comme indiqué dans le **guide FAFO 1** pour mobiliser un certain volume de sol environnant afin d'assurer la stabilité de la fondation d'un ouvrage en maçonnerie (le lecteur est invité à se référer à ce guide pour ce domaine d'emploi). **Les clous** (sous forme de barres métalliques), désignés dans la suite du document par le terme **«broches ou épingles»** et **les boulons d'ancrage,** peuvent aussi être utilisés pour solidariser différents éléments d'une structure en maçonnerie, comme indiqué ci-après.

**Les renforcements et les réparations par broches, boulons et tirants d'enserrement…** sont destinés, soit à limiter les déplacements de tout ou partie d'ouvrages en maçonnerie, soit à empêcher l'ouverture de fissures, soit à solidariser différents éléments d'une structure en maçonnerie. Ils font appel à différentes armatures passives ou actives traversantes ou non qui peuvent être laissées libres ou qui sont scellées partiellement ou totalement dans la maçonnerie.

***ATTENTION :*** *si les armatures doivent être mises en tension, elles ne peuvent être scellées sur toute leur longueur avant leur mise en tension. Cependant, après mise en tension, la partie restée libre doit être protégée contre les agents agressifs par une injection complémentaire qui améliore l'adhérence et permet au boulon de jouer aussi le rôle d'une broche.*

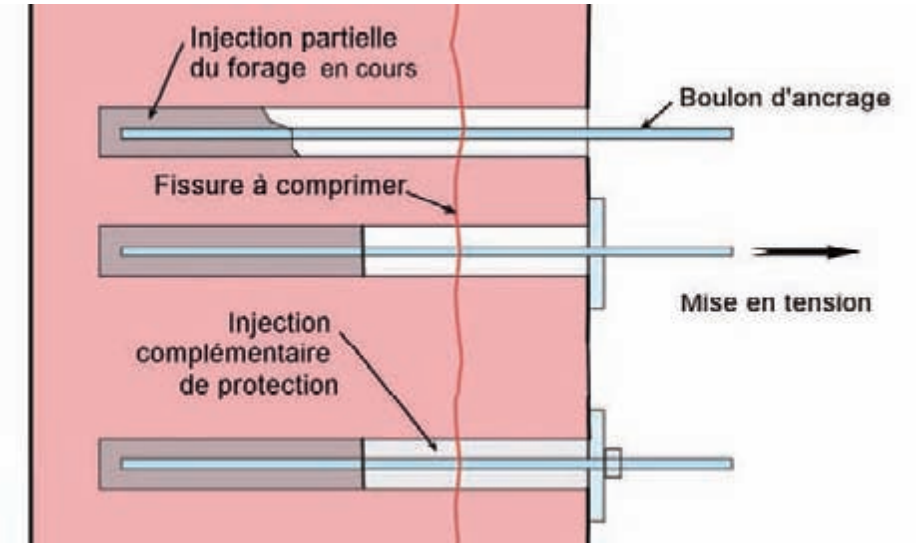



***Figure n° 33 : croquis explicatif : boulon d'ancrage de type 1 ou 2***

**Il est conseillé d'utiliser préférentiellement des armatures passives.** En effet, les unités de précontrainte exercent des efforts concentrés importants que la maçonnerie, hétérogène et fissurée peut avoir des difficultés à absorber. De plus, l'évolution dans le temps des déformations par fluage de la maçonnerie est difficilement quantifiable et maîtrisable[9].

[9] *Lors de la réparation du pont de Villeneuve-Loubet, pour lequel un réglage de la poussée de certaines des voûtes à été effectué, la mise en pression des vérins a dû être répétée durant toute une semaine avant d'atteindre la stabilisation de l'effort de poussée.*

Une mise en contact des pièces d'appui est cependant nécessaire. De plus, une légère mise en tension peut permettre d'éviter, en cas de nouvelles sollicitations, la formation de fissures dans la zone réparées lors de l'allongement élastique de l'armature.

**La précontrainte** est donc à réserver, d'une part, à des maçonneries constituées de pierres et de mortiers de très bonne résistance et, d'autre part, lorsqu'une solidarisation efficace entre deux parties de maçonnerie est nécessaire (par exemple, décollements très marqués entre bandeau et corps de voûte). De plus, des **essais de convenance spécifiques** sont à prévoir pour s'assurer de la maîtrise des déformations différées.

Sous réserve d'opérations d'entretien préventif et, si besoin est, de réparations ou de renforcements, ***la maçonnerie a une durée de vie beaucoup plus importante que celle les autres matériaux de construction*** (le béton et l'acier). Il est donc nécessaire que les produits et matériaux utilisés lors des réparations et/ou renforcement aient une durée de vie adaptée à celle de la maçonnerie.

***Il est donc conseillé,*** au minimum, d'utiliser des ***armatures traitées contre la corrosion,*** sous réserve qu'elles soient ***facilement remplaçables (non scellées ou protégées par un produit souple).*** Si ce n'est pas le cas, il est préférable d'avoir recours à des ***armatures non corrodables*** (armatures composites [résines fibrées], armatures en aciers inoxydables de composition adaptée…). Ce choix relève du ***maître d'ouvrage.***

Pour les armatures métalliques, les documents susvisés ***TA 95 et Clouterre*** définissent les diverses solutions de protections à mettre en œuvre.

## 4.3.1 DOMAINE DU GÉNIE CIVIL

**Dans le domaine des ponts en maçonnerie,** ces réparations et/ou renforcements s'appliquent très souvent **aux fissures et fractures longitudinales** qui se développent dans les voûtes. Elles se manifestent, le plus souvent, soit en partie centrale de la voûte à l'intrados, soit à la jonction entre les bandeaux et le corps de voûte. Le déversement des murs tympans, qui accompagne souvent les désordres des voûtes, relève aussi de ces techniques. Les causes de ces différents désordres sont décrites dans **la 4ème partie du guide FABEM 6.1.** Ces techniques peuvent également s'appliquer pour réparer ou renforcer les divers murs (de front, en retour, en aile, de soutènement), les chaines d'angle…

***Photo n° 30 : décollement entre le bandeau et le corps de voûte du pont du nid d'oie à Clisson***
*(crédit photo CETE de l'Ouest - Jacques Billon)*

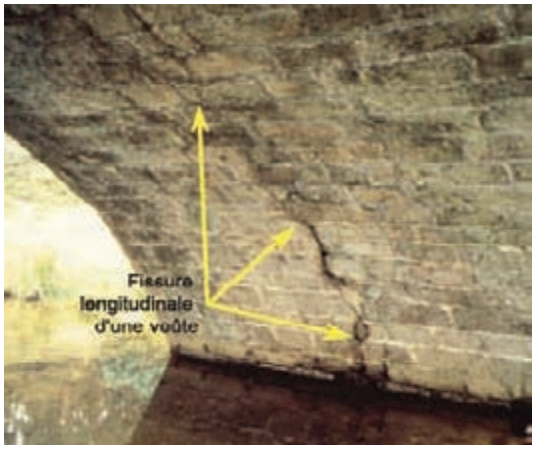



***Photo n° 31 : fissure longitudinale dans une voûte*** *(extrait IQOA - crédit photo SETRA)*

***ATTENTION :*** *les fissures biaises de torsion dans un corps de voûte sont dues à des tassements. Elles ne relèvent donc pas que des techniques décrites ci-après. Une reprise des fondations doit s'imposer en premier.*

***Photo n° 32 : décollement entre le tympan et le bandeau du pont du nid d'oie à Clisson***
*(crédit photo CETE de l'Ouest - Jacques Billon)*

Dans certains cas, il peut se produire un rejet (décalage horizontal) entre **le tympan et le bandeau,** qui se manifeste par une fissure ou une fracture au-dessus du bandeau, avec ou sans décollement entre le bandeau et le corps de voûte.

Dans certains cas enfin, ces méthodes doivent être complétées par d'autres techniques de réparation et/ou renforcement lorsque plusieurs désordres se combinent. Dans le cas de la photo ci-après, il faut prévoir le remplacement des pierres endommagées.

***Photo n° 33 : combinaison de plusieurs désordres (décollement du bandeau, écrasement et fendage de pierres...***
*(crédit photo LRPC)*

Lorsque les désordres à la jonction bandeau et corps de voûte ou du corps de voûte sont de faible importance (fissures peu ouvertes et très faible déversement des tympans ou murs de tête), le recours à des boulons non traversant ou à des broches est envisageable.

**> L'opération consiste, après avoir réalisé des forages de faible longueur (2 à 3 mètres) à mi-hauteur du bandeau :**

- **pour le boulonnage,** à y introduire un boulon à ancrage ponctuel ou à ancrage continu avec une tête d'ancrage (plaque d'appui, rondelle, écrou et contre-écrou). Ensuite, le boulon est mis en tension. Les boulons sont, le plus souvent, vendus prêts à l'emploi par les fabricants ;
- **pour le brochage,** à y sceller des barres à haute adhérence, soit entièrement noyées, soit munies d'une tête d'ancrage (partie filetée avec écrou et contre-écrou) pour être mise en légère tension (dans ce dernier cas, il s'agit d'un boulon à ancrage continu).

***NOTA :*** *le terme* ***d'épinglage*** *est aussi utilisé pour désigner la mise en place de* ***broches*** *constituées par des armatures de béton armé de faible diamètre.*

**Si le boulonnage et le brochage ont pour but de traiter une fissuration** (de faible importance) située dans **la partie centrale du corps de voûte,** la longueur des forages est à adapter et les forages sont à effectuer alternativement de l'amont vers l'aval et de l'aval vers l'amont.

**Dans les deux cas,** il faut alterner des forages de longueurs différentes de façon à ne pas favoriser la création d'une ligne de moindre résistance.

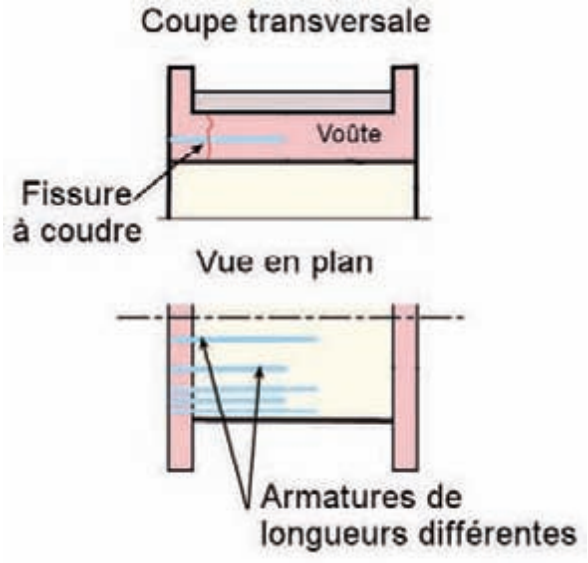



***Figure n° 34 : bonne disposition des armatures de brochage***

**Lorsque les désordres à la jonction bandeau et corps de voûte ou du corps de voûte sont plus importants,** il convient de mettre en place des **armatures traversantes passives ou actives,** appelées **tirants d'enserrement.**

**Les tirants passifs** sont des boulons munis de deux têtes d'ancrage avec plaques de répartition et **les tirants actifs** sont des armatures de précontrainte. Ces tirants sont placés dans des forages traversants réalisés à mi-hauteur du bandeau. Les fissures ou les fractures existantes doivent être comblées par un mortier ou un coulis.

Dans le cas où, en plus, les **tympans ou murs de tête sont déversés, des tirants supplémentaires** sont à mettre en place dans des forages réalisés dans le remblai. Ces derniers tirants peuvent aussi être mis en place après décaissement du remblai si celui-ci est de mauvaise qualité et doit être remplacé.

***Photo n° 34 : tirants d'enserrement du bandeau et tirants supplémentaires pour les murs tympans***
*(crédit photo CETE de l'Ouest - Hervé Foucher)*

**Lorsqu'il y a un rejet entre le(s) tympan(s) et le(s) bandeau(x)** mais sans décollement entre le(s) bandeau(x) et le corps de voûte, il convient de mettre en place des **tirants d'enserrement (normalement passifs)** placés dans des forages réalisés au travers des tympans et du remblai.

**> Ces réparations et/ou renforcements s'appliquent aussi aux différents murs en maçonnerie (murs de tête ou tympans, murs en retour, murs de soutènement…) lorsqu'ils présentent certains désordres comme des gonflements, des déversements…Par exemple :**

- des tirants d'enserrement peuvent, en réunissant les tympans amont et aval d'un pont-voûte, assurer leur stabilité ;
- des broches ou épingles (barres de BA) scellées verticalement peuvent permettre de réaliser le surhaussement d'un mur de soutènement en maçonnerie par une partie en béton armé, qui sera ainsi liée au reste de la maçonnerie. Bien entendu sous réserve que sa stabilité reste assurée…

## 4.3.2 DOMAINE DU BÂTIMENT

**Dans le domaine du bâtiment et des monuments, historiques ou non,** ces techniques de réparation et/ou de renforcement sont principalement utilisées pour reprendre les poussées des voûtes lorsque les contreforts n'assurent pas correctement cette fonction, pour équilibrer les poussées des charpentes, pour stabiliser les murs au niveau des planchers, pour armer des murs… À ces réparations peut être combinée une reprise des fondations…

Dans ce domaine, l'utilisation des tirants d'enserrement est la plus fréquente. Les photographies qui suivent montrent quelques exemples de réparations provisoires ou définitives plus ou moins complexes.

***Photo n° 35 : réparation provisoire d'un bâtiment au Kremlin-Bicêtre*** *(crédit photo D. Poineau)*

***Photo n° 36 : tirants d'enserrement d'un bâtiment dans les Hautes-Alpes*** *(crédit photo D. Poineau)*

***Photo n° 37 : tirants d'enserrement d'un pavillon en région parisienne*** *(crédit photo D. Poineau)*

***Photo n° 38: renforcement d'un monument à Rome*** *(crédit photo D. Poineau)*

**Dans certains cas, les dispositifs de réparation sont assez complexes.**

***Photo n° 39 : étriers suspentes d'un linteau de la basilique Saint-Pierre de Rome*** *(crédit photo D. Poineau)*

## 4.4.1 GÉNÉRALITÉS

Ce paragraphe comporte quatre sous-paragraphes sur le mode de fonctionnement et les caractéristiques **des différents types de boulons d'ancrage, de broche, de tirants d'enserrement et de procédés d'entreprises.** Ces informations permettent de choisir le matériel le mieux adapté pour effectuer la réparation et/ou le renforcement.

**> Les sous-paragraphes suivants traitent des critères de choix des principaux produits et matériaux utilisés pour réaliser les boulons d'ancrage, les broches, les tirants d'enserrement… et leur mise en œuvre. Il s'agit :**

- des armatures sous forme de barres de type béton armé ou non[10] (en acier ordinaire, en acier ordinaire galvanisé et en acier inoxydable) ;
- des unités et armatures de précontraintes (câbles, torons et barres) ;
- des armatures composites passives ou actives ;
- des conduits et gaines ;
- des profilés métalliques (barres, cornières, UAP, UPN…) pour la réalisation des tirants passifs, des plaques de répartition et des dispositifs d'ancrage ;
- des aciers moulés pour la confection des dispositifs d'ancrage et des plaques de répartition;
- des produits et systèmes de produits de protection contre la corrosion et les autres agressions ;
- des produits et systèmes de produits de scellement et de calage ;
- des procédés d'entreprise.

**Le marché** fixe les caractéristiques que doivent présenter **ces produits et matériaux** en faisant référence **aux textes** (CCTG et DTU) et **aux normes en vigueur** listés ci-après ou, si nécessaire, fixe les performances à satisfaire. **L'entrepreneur** propose les produits et matériaux à l'acceptation du **maître d'œuvre.**

***Rappel important :*** *dans un* ***marché****, la référence à une norme ne suffit pas, puisque plusieurs niveaux de performance peuvent être exigés d'un même produit. Il convient d'analyser la norme concernant le produit et de se reporter aux* ***DTU*** *et* ***fascicules du CCTG,*** *qui donnent souvent les niveaux de performance à exiger et des conseils sur les documents et guides à consulter.*

[10] *Ces barres appartiennent à la catégorie des profilés métalliques.*

## 4.4.2 MODE DE FONCTIONNEMENT ET CARACTÉRISTIQUES DES BOULONS À ANCRAGE PONCTUEL ET À ANCRAGE CONTINU

Les boulons d'ancrage sont constitués par des tiges en acier de diamètre adapté aux efforts à équilibrer (en général de 10 à 25 mm de diamètre) et de 1,50 à 6,00 m de longueur, qui sont mises en place dans un conduit foré ou non. À une extrémité, ils sont munis d'une tête d'ancrage qui sert à leur mise en tension. Cette tête d'ancrage est composée d'une plaque de répartition sur laquelle s'appuie un écrou de serrage par l'intermédiaire d'une rondelle.

**> Ils appartiennent aux deux familles suivantes :**

- **les boulons à ancrage ponctuel ;**
- **les boulons à ancrage continu ;**

**> Ces boulons d'ancrage sont utilisés couramment dans les travaux souterrains (creusement de tunnels…) pour la consolidation des terrains décomprimés par les travaux :**

- si l'épaisseur de terrain décomprimé est < 2,00 m, les boulons sont utilisés pour suspendre cette couche médiocre au terrain sain ;
- si l'épaisseur est > 2,00 m, les boulons sont scellés dans la couche décomprimée pour créer un arc de décharge résistant.

***NOTA :*** *dans les travaux souterrains, les boulons sont très souvent associés à la mise en œuvre d'une couche de béton projeté pour stabiliser l'excavation.*

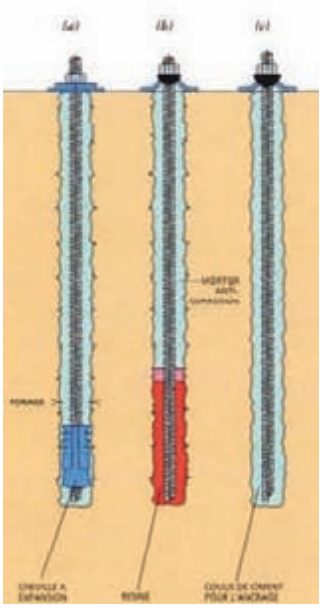


***Figure n° 35 : les trois sortes de boulons d'ancrage (d'après la documentation DSI France)***

- **les boulons à ancrage ponctuel** sont scellés dans le forage par un dispositif localisé à l'extrémité opposée à l'ancrage, qui s'expanse et exerce une forte pression sur la zone de terrain concernée. C'est un ancrage par frottement. La mise en charge est rapide ;
- **les boulons à ancrage continu** sont scellés sur une partie de leur longueur dans des trous réalisés par forage. Le mortier de scellement peut être :

  1) à base de résines contenues dans des ampoules ou des cartouches. La mise en charge est rapide,

  2) à base de ciment mis en place dans le forage par injection. La mise en charge est liée à la vitesse de durcissement du coulis.

Le tableau qui suit donne, **dans le cas des tunnels en construction,** voire en réparation, les conditions d'emploi de ces deux familles de boulons et leurs inconvénients. Ces limites d'emploi sont à adapter au cas des ponts et murs en maçonnerie, quelques indications à ce sujet sont fournies dans le tableau n° 8.

| Famille de boulons | Conditions d'emploi | inconvénients |
|---|---|---|
| **Boulons à ancrage ponctuel** | Le terrain au droit du système d'expansion doit être résistant et compact (résistance ~30 MPa). Ils sont à éviter si la roche est fissurée | La force axiale est faible.<br>Perte de charge importante après mise en œuvre.<br>Le diamètre du forage joue sur l'efficacité de l'ancrage. |
| **Boulons à ancrage continu de type 1)** | Grande capacité portante si le terrain est résistant et compact. | Défaut de polymérisation possible en présence d'eau<br>Mauvaise adhérence si des débris sont présents dans le forage.<br>Le trou, réalisé par forage, doit avoir un diamètre régulier et être exempt de fissures (la quantité de résine étant limitée au contenu des ampoules et cartouches). |
| **Boulons à ancrage continu de type 2)** | Utilisation si le terrain est fissuré et trou mal calibré.<br>Grande capacité portante si le terrain est résistant et compact. | Déconseillé en présence d'eau à cause du risque lessivage du mortier d'injection. Il existe cependant des solutions telles que : adjuvants-chaussettes et accélérateurs tubes à manchette.<br>La pleine efficacité demande un délai d'attente, celui qui est nécessaire à la prise et au durcissement du mortier.<br>La qualité du ciment du mortier doit être adaptée à l'agressivité du terrain. |

***Tableau n° 7 : conditions d'emploi des boulons d'ancrage en tunnel***

| Famille de boulons | Limites d'emploi complémentaires |
|---|---|
| **Boulons à ancrage ponctuel** | **Nécessité d'une protection du boulon** contre la corrosion, puisque le boulon est libre dans le forage.<br>Durabilité limitée si une injection complémentaire d'un coulis à base de ciment n'est pas effectuée. Si la tige du boulon est nervurée, le coulis améliore l'adhérence et ajoute, au boulon, un rôle de broche. |
| **Boulons à ancrage continu de type 1 (scellement à la résine)** | **Nécessité d'une protection du boulon** contre la corrosion à cause de la partie non scellée.<br>Les résines de pH~7 n'assurent pas la passivation de l'acier des boulons. Si l'enveloppe de résine n'est pas continue autour du boulon, il y a risque de corrosion.<br>Durabilité limitée sauf en cas d'injection complémentaire de la partie non scellée. |
| **Boulons à ancrage continu de type 2 (scellement au coulis de ciment)** | **Attention, certains boulons de type 2 sont assimilables à des broches car ils ne sont pas mis en tension.**<br>**Nécessité d'une protection du boulon** contre la corrosion à cause de la partie non injectée.<br>Durabilité limitée sauf en cas d'injection complémentaire de la partie non injectée. |

***Tableau n° 8 : quelques limites d'emploi des boulons d'ancrage dans les ponts et murs en maçonnerie***

***Attention : il faut adapter la protection des boulons aux exigences de durabilité de la réparation ou du renforcement.***

**> Quand utiliser un boulon d'ancrage pour la réparation et ou le renforcement d'un ouvrage en maçonnerie ?**

- lorsque les efforts à reprendre sont supérieurs aux capacités d'adhérence des pierres constituant la maçonnerie ;
- lorsque le matériau que l'on cherche à renforcer n'est pas d'une qualité suffisante pour permettre l'adhérence que requiert le scellement d'une broche ;
- lorsque l'on est en présence de cavités ou de failles importantes (qu'il faudra bien entendu obturer avant le serrage du boulon) ;
- lorsque l'on souhaite stabiliser mécaniquement une partie de la structure d'un ouvrage en l'ancrant dans la maçonnerie elle-même (exemple : l'ancrage d'un bandeau dans le corps de voûte) ;
- lorsque l'on souhaite accrocher un élément rajouté à la structure existante ;
- pour un confortement provisoire pendant une phase de travaux (par exemple : la démolition partielle d'une partie de maçonnerie déformée et instable)…

La condition nécessaire à la mise en œuvre d'un boulon d'ancrage est donc principalement la **bonne qualité des matériaux aux deux extrémités du boulon** (tête et ancrage), de façon que l'effort de serrage soit réparti le mieux possible dans la structure. Si cette condition n'était pas vérifiée, il y a un risque de provoquer des désordres par un effet d'entraînement.

A ce propos, il est recommandé, lorsque plusieurs boulons doivent être mis en œuvre parallèlement, **d'alterner la position de leur zone d'ancrage** (prévoir des longueurs différentes) afin d'éviter les plans de fracturation, entre la partie de maçonnerie ancrée et celle située immédiatement à l'arrière.

Un boulon travaille donc en traction, suivant l'axe longitudinal de sa barre. Si des efforts verticaux (ou inclinés plus ou moins par rapport à l'axe) doivent être repris, le mode de fonctionnement est à vérifier, puisqu'on introduit, dans ce cas, des contraintes proches du cisaillement. Le type de boulon doit être étudié pour équilibrer ces efforts.

Les fabricants proposent des boulons appartenant aux deux familles dont certains peuvent être utilisés pour le confortement d'ouvrages en maçonnerie. De plus, certains boulons sont auto-foreurs. Il convient de solliciter les conseils de ces professionnels et de s'assurer que leur conception, en particulier en matière de protection, leur assure une durée de vie adaptée à l'ouvrage à renforcer.

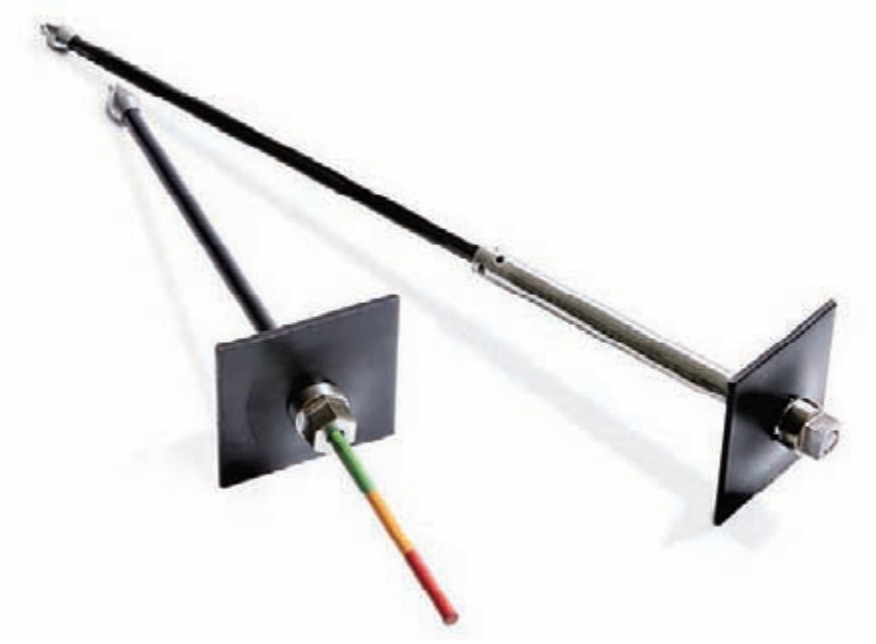


***Photo n° 40 : boulons d'ancrage ponctuel « roofex »*** *(crédit photo Atlas Copco)*

**Les tableaux ci-dessous indiquent à titre d'exemple les caractéristiques des boulons d'ancrage de la société DSI :**

| Type de boulon | Diamètre du forage (mm) | Diamètre du boulon (mm) |
|---|---|---|
| À ancrage ponctuel ou à ancrage continu | 33/37 | 15 - 16 |
| | 34/38 | 15 - 16 - 20 |
| | 13/48 | 15 - 16 - 20 |
| | 50/58 | 15 – 16 – 20 – 26 - 28 |
| | 59/64 | 25 – 26 – 28 - 32 |

***Tableau n° 9 : dimensions des boulons d'ancrage***

| Qualité de l'acier (barres GEWI) $f_y/f_t$ (MPa) | Diamètre du boulon (mm) | Section du boulon (mm²) | Limite élastique (kN) | Limite de rupture (kN) |
|---|---|---|---|---|
| 500/550 | 16 | 201 | 101 | 111 |
| | 20 | 314 | 157 | 173 |
| | 25 | 491 | 246 | 270 |
| | 28 | 616 | 308 | 339 |
| | 32 | 804 | 402 | 442 |

***Tableau n° 10 : caractéristiques mécaniques des boulons d'ancrage***

**Le choix des produits de scellement** figure dans la suite du présent guide.

***REMARQUE :*** ***les chevilles métalliques pour béton*** *s'apparentent aux boulons. Elles font l'objet de l'ATE N°001 qui distingue : les chevilles à expansion par vissage à couple contrôlé, les chevilles à verrouillage de forme, les chevilles à expansion par déformation contrôlée et les chevilles à scellement. Ce règlement concerne, à la fois, le dimensionnement, l'armature, le produit de scellement et la méthodologie de mise en œuvre et de contrôle.*

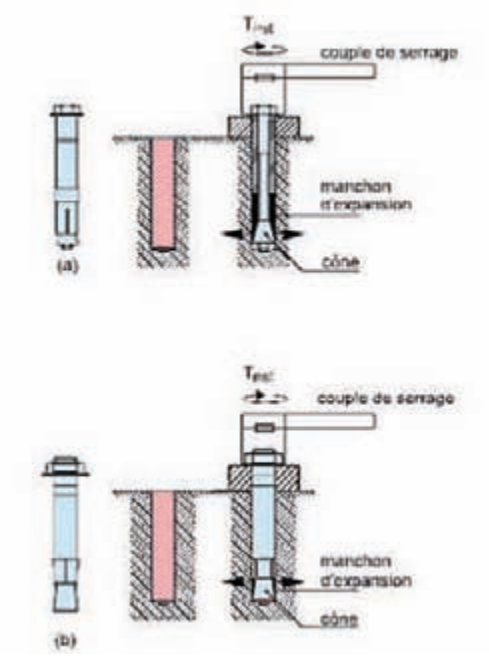



***Figure n° 36 : cheville métallique pour béton à expansion par vissage à couple contrôlé (extrait de l'ATE n°001)***

## 4.4.3 MODE DE FONCTIONNEMENT ET CARACTÉRISTIQUES DES BROCHES ET ÉPINGLES

Contrairement au boulon d'ancrage, qui fonctionne de façon ponctuelle et qui doit être mis en tension, une broche (ou épingle dans le cas de barres de faible diamètre) fonctionne grâce à l'adhérence qui se crée entre la broche et le produit de scellement (généralement du mortier) et entre celui-ci et la maçonnerie. La broche (généralement métallique) ne joue, ici, que le rôle d'armature du cylindre de scellement. Une broche est en fait une sorte d'armature qui sert de harpage à l'intérieur de la maçonnerie. Son rôle est principalement de limiter les déplacements relatifs d'éléments à l'intérieur d'une maçonnerie.

Elles sont souvent utilisées dans les ponts, le plus souvent pour stabiliser des fissures légèrement ouvertes entre le bandeau et la douelle d'une voûte, ainsi qu'entre les faces perpendiculaires d'une chaîne d'angle.

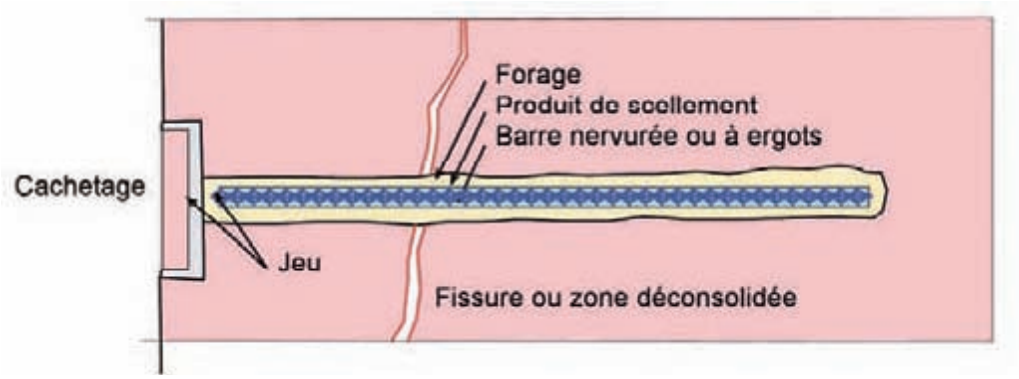



***Figure n° 37 : schéma d'une broche***

**> Une broche (ou épingle) se compose :**

- d'une barre d'acier (de préférence crénelée) comme une armature de béton armé à haute adhérence (attention à la protection contre la corrosion) ;
- d'un remplissage annulaire sous forme d'un mortier situé entre la paroi du forage et la barre d'acier.

***NOTA :*** *le terme de «clou» (utilisé pour la stabilisation d'écrans) n'a pas été retenu, car le* ***clou*** *est, comme celui du charpentier* ***«battu»*** *à sa mise en œuvre. Au contraire, la* ***broche*** *nécessite d'abord la création de son logement, elle y est ensuite installée et scellée.*

**> Choix et dimensionnement d'une broche :**

Si pour déterminer la nature et la qualité des boulons d'ancrage, il suffit, généralement, de connaître l'ordre de grandeur des efforts à reprendre, pour les broches, cette approche est beaucoup plus aléatoire. En effet, le principe même du brochage est de relier au minimum deux pierres ensembles. Sa limite de résistance est égale à la force d'adhérence mobilisable entre le mortier de scellement de la broche et la pierre environnante, mais aussi à la résistance de la pierre.

L'essai d'ancrage visé en 3.4.1 ci-dessus permet d'évaluer l'adhérence entre le mortier de scellement et la maçonnerie.

Pour une maçonnerie saine, la contrainte de scellement coulis-pierre peut être considérée identique à celle du coulis-rocher, soit entre 300 à 400 kPa (se reporter au document Clouterre). Ces valeurs permettent un dimensionnement du renfort, mais elles doivent être confirmées par des essais. Dans la plupart des cas, les charges sont limitées par la résistance globale de l'ouvrage en maçonnerie.

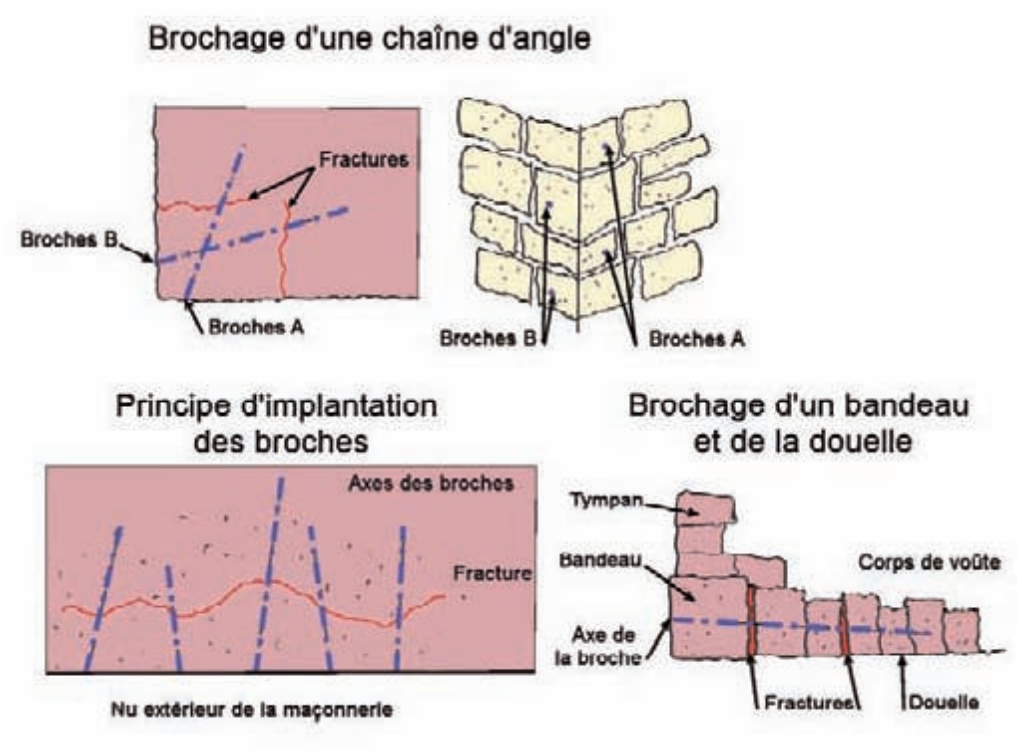



*Figure n° 38 : schéma d'implantation des broches*

**La broche** permet donc de reconstituer le fonctionnement normal de la maçonnerie dans laquelle elle est incorporée. Quels que soient les efforts qui sont en jeu, la capacité de la broche est donc toujours limitée à la capacité de résistance des pierres composant cette maçonnerie.

Si les efforts en présence risquent d'être supérieurs à cette résistance, une étude complémentaire doit être entreprise afin de prévoir un autre moyen de confortement.

Comme pour les boulons, il faut éviter de positionner les broches parallèlement entre elles et de leur donner à chacune la même longueur. En effet, ceci aurait pour effet de provoquer des plans de fracturation perpendiculaires dans la zone située près de leur extrémité.

Il faut, au contraire, les positionner suivant des axes convergeant (en provoquant des effets de «coins») et en leur donnant des longueurs différentes.

La broche se calcule donc en partant de la valeur d'adhérence entre le mortier de scellement et la paroi de la maçonnerie encaissante. Comme cela a été indiqué plus haut, il faut donner à la broche (barre + mortier de scellement) sensiblement la même valeur de traction que celle que peut encaisser la pierre environnante. En effet, il ne sert à rien de prévoir une broche dont la résistance nominale à la traction serait supérieure à celle des pierres qu'elle est censée consolider.

**> Quelques valeurs basées sur l'expérience empirique permettent de dimensionner rapidement les broches :**

- le diamètre du forage est fonction de la valeur d'adhérence recherchée (voir tableau) ;
- le diamètre du forage doit être égal à 2,5 fois celui de la barre ;
- la longueur de la broche, au-delà de la zone de fractures à stabiliser, doit être comprise entre 40 et 60 diamètres (diamètre de la barre ancrée).

**Pour un dimensionnement plus précis,** il faut se reporter **au fascicule de documentation FD P 18-823 :** Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - Produits de scellement à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Recommandations pour le dimensionnement des scellements de barres d'armature dans le béton. Bien entendu, comme le scellement concerne des maçonneries, des adaptations sont à prévoir.

Ce dimensionnement, si le **marché** le prévoit, est vérifié par un ou plusieurs essais d'ancrage tels que décrit dans le paragraphe 3.4.1 ci-dessus.

Le brochage (ou l'épinglage) des parties en maçonnerie utilise principalement des **armatures de béton armé** en acier ordinaire, en acier ordinaire galvanisé et en acier inoxydable conformes à la norme européenne et aux normes de produits visées par cette norme. Il existe également des broches en matériaux composites (fibres de verre enrobés dans une résine…) scellées à l'aide de résines synthétiques. Ce type de brochage est plutôt réservé à la consolidation de terrain, surtout dans le cadre de creusement de souterrains. Elles peuvent être utilisées pour la maçonnerie.

**Les caractéristiques** des armatures de béton armé, des broches en matériaux composites, des produits de calage et de scellement figurent dans la suite du présent guide.

## 4.4.4 MODE DE FONCTIONNEMENT ET CARACTÉRISTIQUES DES TIRANTS D'ENSERREMENT

**> Lorsque l'on sort du domaine d'emploi des boulons d'ancrage ou des broches et qu'il est nécessaire de mettre en place des armatures de grande longueur sur toute la largeur d'un ouvrage en maçonnerie, par exemple pour empêcher les deux bandeaux ou les deux tympans de s'écarter, il faut avoir recours aux tirants d'enserrement passifs ou actifs :**

- **les tirants passifs** sont, le plus souvent, des tiges métalliques (des tirants en matériaux composites peuvent être utilisés) filetées aux deux extrémités, munies de deux têtes d'ancrage avec plaques de répartition. Ils sont légèrement tendus pour que leurs têtes d'ancrage soient correctement plaquées sur la maçonnerie et pour annuler le mou de la tige. Lorsque la maçonnerie bouge, ils se mettent en tension et commencent alors à jouer leur rôle de renfort ;
- **les tirants actifs** sont des armatures de précontrainte sous forme de torons, câbles ou de barres. Ils exercent leur fonction de renfort dès qu'ils sont mis en place.

**> Par exemple :**

- pour le serrage des deux bandeaux, ces tirants sont placés dans des forages traversants réalisés à mi-hauteur du bandeau. Les fissures ou les fractures existantes doivent être comblées par un mortier ou un coulis ;

- dans le cas où les tympans ou murs de tête sont déversés, ces tirants sont à mettre en place dans des forages réalisés dans le remblai. Ces derniers tirants peuvent aussi être mis en place après décaissement du remblai, si celui-ci est de mauvaise qualité et doit être remplacé.

***NOTA :*** *la mise en place de tirants d'enserrement peut s'accompagner, si nécessaire, de la construction d'un ou de murs transversaux sur lesquels les tympans vont être serrés et stabilisés par les tirants.*

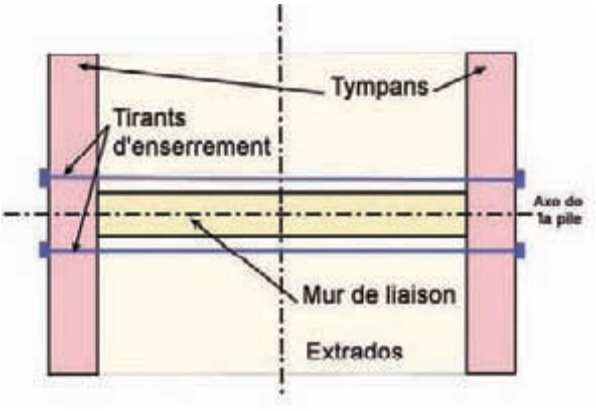



***Figure n° 39 : mur de liaison transversale et tirants d'enserrement***

***Photo n° 41 : tirant d'enserrement avec tête d'ancrage en croix de Saint-André. La protection de l'extrémité de la barre n'est pas assurée*** *(crédit photo JL. Michotey)*

Dans le cas des ponts en maçonneries l'estimation des poussées exercées par les terres et les charges roulantes permettent d'évaluer les efforts à reprendre et donc le dimensionnement des tirants d'enserrement à mettre en place.

Il est nécessaire de répartir les efforts sur la totalité de la surface du bandeau ou du tympan en multipliant le nombre des tirants (par exemple, un tirant tous les trois voussoirs pour un bandeau) et/ou en augmentant la surface des plaques d'ancrage sous forme de croix de Saint-André… Il faut aussi placer le tirant au centre de gravité des voussoirs et non sur un joint.

**Les caractéristiques des barres métalliques ou des armatures de précontrainte** destinées à constituer des tirants d'enserrement ainsi que le choix des constituants des têtes d'ancrage, des produits de calage et de scellement, des produits de protection…sont développés ci-après dans la suite du présent guide.

## 4.4.5 MODE DE FONCTIONNEMENT ET CARACTÉRISTIQUES DE PROCÉDÉS D'ENTREPRISES

**> Il existe également des systèmes de renforcement de la maçonnerie brevetés mis au point par certains fabricants et applicateurs qui peuvent s'apparenter à des broches ou à des tirants. Par exemple :**

- des armatures torsadées de petit diamètre en acier inoxydable, à sceller au mortier dans des saignées pratiquées dans un ouvrage en maçonnerie pour stopper la fissuration (procédé Torsinox®) ;
- des tiges métalliques disposées comme les tentacules d'une pieuvre, qui sont ancrées dans un chaînage en béton armé réalisé tout autour des murs d'une construction puis mis en tension pour en empêcher l'écartement sous la poussée de la charpente…

Il convient de s'assurer que ces produits peuvent satisfaire aux exigences d'efficacité relatives à la réparation structurelle, en particulier vis-à-vis de la durabilité.

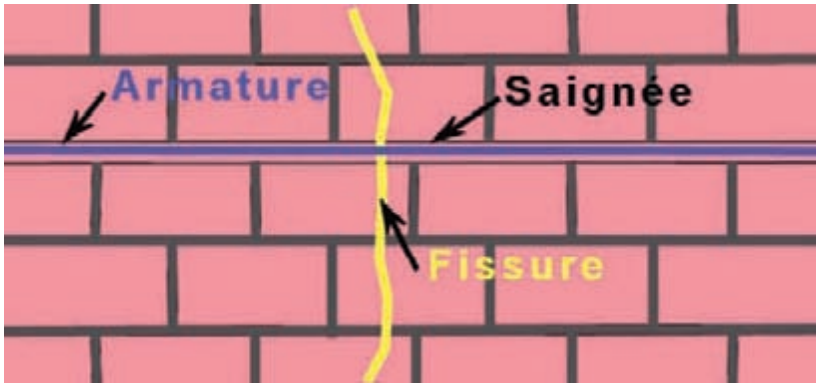



*Figure n° 40 : principe de renforcement d'un mur en maçonnerie de briques*

***Photo n° 42 : détail du scellement des armatures de renfort dans les murs*** *(crédit photo A. Bouineau)*

Les armatures dans des saignées jouent le rôle de tirants d'enserrement. Un renforcement de la maçonnerie vis-à-vis des actions sismiques peut être ainsi assuré par cette technique.

***Photo n° 43 : renfort par armatures noyées dans les murs d'un bâtiment*** *(crédit photo A. Bouineau)*

***Photo n° 44 : chaînage périphérique en tête des murs extérieurs et plaque d'ancrage scellée dans le chaînage lors du bétonnage de ce dernier***

***Photo n° 45 : pièce centrale permettant la mise en tension des tirants fixés sur les différentes plaques d'ancrage***

## 4.4.6 ARMATURES DE BÉTON ARMÉ

Les armatures de béton armé en acier ordinaire, en acier ordinaire galvanisé et en acier inoxydable sont conformes à la norme européenne et aux normes de produits visées par cette norme.

**> Norme européenne :**

- **NF EN 10080 :** Aciers pour l'armature du béton – Aciers soudables pour béton armé – généralités.

**Les différentes catégories d'aciers** relèvent des normes françaises listées ci-dessous (les normes relatives aux treillis soudés, sans objet ici, ne sont pas répertoriées).

**> Normes françaises :**

- **XP A 35-014 :** Armatures pour béton armé - Barres et couronnes lisses, à verrous ou à empreintes en **acier inoxydable ;**
- **NF A 35-015 :** Armatures pour béton armé - Ronds lisses soudables ;
- **NF A 35-016-1 :** Aciers pour béton armé – Aciers soudables à verrous – Partie 1 : barres et couronnes ;
- **NF A 35-017 :** Armatures pour béton armé - Barres et fils machine non soudables à verrous ;
- **NF A 35-019-1 :** Armatures pour béton armé - Armatures constituées de fils soudables à empreintes - Partie 1 : Barres et couronnes ;
- **NF A 35-020-1 :** Produits en acier – dispositifs de raboutage ou d'ancrage d'armatures à haute adhérence pour le béton – Partie 1 : prescriptions relatives aux performances mécaniques ;
- **NF A 35-020-2 :** Produits en acier – dispositifs de raboutage ou d'ancrage d'armatures à haute adhérence pour le béton – Partie 2 : méthodes d'essai ;
- **NF A 35-021 :** Acier pour béton - Fils soudables utilisés pour la fabrication d'armatures pour béton ;
- **XP A 35-025 :** Armatures pour béton armé - Ronds lisses **galvanisés à chaud** - Barres, fil-machine et fils à haute adhérence, fils constitutifs de treillis soudés **galvanisés à chaud ;**
- **NF A 35-027 :** Armatures pour béton armé – Armatures ;
- **FD A 35-029 :** Armatures pour béton armé – Assemblages soudés – Qualification d'un mode opératoire de soudage – Qualification des soudeurs.

**> Norme ISO :**

- **ISO 14654 :** Armatures en acier pour béton armé avec revêtement époxy.

**Les armatures à haute adhérence** bénéficient d'une certification de conformité par l'intermédiaire de la **Marque NF-Aciers pour béton armé** gérée par **l'Association Française pour la Certification des Armatures de Béton armé (AFCAB).**

Il appartient au **marché** de fixer les types d'armatures de béton à mettre en œuvre en tenant compte du facteur durabilité et, si nécessaire, le traitement de protection contre la corrosion à appliquer.

Pour assurer une résistance durable vis-à-vis de la corrosion, il est possible d'utiliser des armatures en **acier inoxydable**[11]. Se reporter à **l'annexe 3 du guide FABEM 1** qui détaille les propriétés de ces armatures.

[11] *Consulter le* ***document T.81 de CIMbéton d'avril 2004*** *intitulé : béton armé d'inox ainsi qu'****un document de septembre 2001 de l'Office fédéral des routes suisse*** *(intitulé : utilisation d'aciers d'armature inoxydables dans les ouvrages en béton) et prendre contact avec un laboratoire spécialisé.*

Les armatures de béton armé servant pour le brochage ou l'épinglage sont mises en place dans des trous forés, qui sont ensuite remplis ou injectés avec un produit ou un système de produits qui peut être conforme aux exigences de la norme **NF EN 1504-6,** obligatoirement complétées par les prescriptions du marché à cause des problèmes de compatibilité…

***ATTENTION :*** *dans les deux cas visés ci-dessus, les normes et les règles applicables concernent le scellement d'armatures dans* ***le béton armé.*** *Il est donc nécessaire de les adapter au cas de la maçonnerie. En particulier, il faut s'assurer de* ***la compatibilité du produit avec la maçonnerie*** *(pierre naturelle, brique et mortier).*

## 4.4.7 UNITÉS ET ARMATURES DE PRÉCONTRAINTE

***ATTENTION :*** *le présent article sur la précontrainte remplace les articles correspondants* ***des différents guides FABEM*** *parus à ce jour, compte tenu, essentiellement, des évolutions des procédures d'agrément des procédés de précontrainte.*

***NOTA :*** *le présent texte est applicable aux domaines du bâtiment comme du génie civil, puisque* ***les DTU*** *ne traitent pas, à ce jour, de la précontrainte et renvoient au* ***fascicule 65 du CCTG.***

Le nouveau **fascicule 65 du CCTG,** paru en 2008, indique que **le procédé de précontrainte pour les précontraintes intérieure et extérieure au béton** (ancrages, gaine, coulis de protection…) doit bénéficier **d'un Agrément Technique Européen (ATE)** et **du marquage CE. Le Guide d'Agrément Technique Européen (GATE ou ETAG** en anglais) correspondant est **l'ETAG 13.** Il est disponible sur le site de **l'Organisme Européen d'Agrément Technique (OEAT ou EOTA** en anglais).

**Le fascicule** indique également que les **armatures à haute-résistance** (claires, revêtues, protégées gainées, torons dits standard ou super et barres) pour construction en béton précontraint doivent respecter **le référentiel technique de l'Association pour la Qualification de la Précontrainte et des Équipements des ouvrages (ASQPE),** ce qui impose **la certification** par un organisme accrédité. Ce référentiel est disponible sur le site de l'association.

**> Les normes relatives à la précontrainte (hors gaines et conduits qui sont traités ci-après) sont les suivantes :**

- **Normes européennes :** actuellement, il n'y a pas de norme européenne opérationnelle sur les armatures de précontrainte. Il y a seulement des prénormes **(série prNF EN 10138-1, prNF EN 10138-2, prNF EN 10138-3 et prNF EN 10138-4).**

- **Normes françaises :** les normes françaises expérimentales et homologuées sur les armatures de précontrainte actuellement en vigueur sont les suivantes :

  - **XP A 35-045-1 :** Produits en acier – Armatures de précontrainte – Partie 1 : prescriptions générales ;
  - **XP A 35-045-2 :** Produits en acier – Armatures de précontrainte – Partie 2 : fils ;
  - **XP A 35-045-3 :** Produits en acier – Armatures de précontrainte – Partie 3 : torons ;
  - **NF A 35-035 :** Produits en acier – Fils lisses et torons de précontrainte à 7 fils revêtus par immersion à chaud de zinc ou d'alliage de zinc ;
  - **XP A 35-037-1 :** Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 1 : prescriptions générales ;
  - **XP A 35-037-2 :** Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 2 : prescriptions spécifiques aux torons protégés gainés coulissants (type P) ;
  - **XP A 35-037-3 :** Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 3 : prescriptions spécifiques aux torons protégés gainés adhérents (type SC) ;

- **Normes ISO :** deux normes ISO sont à noter[12] :

  - **ISO 14655 :** Toron pour la précontrainte du béton avec revêtement époxy ;
  - **ISO 14656 :** Poudre époxy et matériau de réparation pour le revêtement des armatures en acier pour béton.

**La plus grande durabilité** peut être obtenue, soit en multipliant **les barrières de protection,** par exemple en utilisant des torons gainés protégés (galvanisés ou non) sous conduit en PEHD injecté au coulis de ciment, soit mettant en œuvre des barres de précontrainte en acier inoxydable.

***NOTA (1) :*** *l'utilisation de gaines en feuillards n'est pas adaptée pour obtenir une durabilité maximale même si, dans l'exemple qui suit, les tirants précontraints seront protégés par la dalle en béton armé de l'élargissement et seront enrobés dans du béton.*

[12] *Ce type de revêtement n'est pas utilisé en France pour les armatures de précontrainte mais peut être utilisé pour la protection d'armatures passives contre la corrosion* ***sous réserve de grandes précautions lors de la mise en œuvre*** *pour ne pas endommager le film protecteur. En effet, dès que des agents agressifs sont en contact avec l'armature, tout défaut local crée une anode de petite dimension, siège d'une corrosion caverneuse très dommageable pour l'armature (se reporter au* ***guide FABEM 1****).*

***Photo n° 46 : mise en place d'armatures de précontrainte - cf. le nota 1*** *(crédit photo DDE 52)*

***ATTENTION*** ***:*** *il peut être nécessaire d'appuyer les ancrages des unités de précontrainte sur* ***des plaques de répartition*** *métalliques ou en béton armé ou en BFUP si la qualité de la maçonnerie n'est pas suffisante pour équilibrer les efforts concentrés exercés lors de la mise en tension et ultérieurement.*

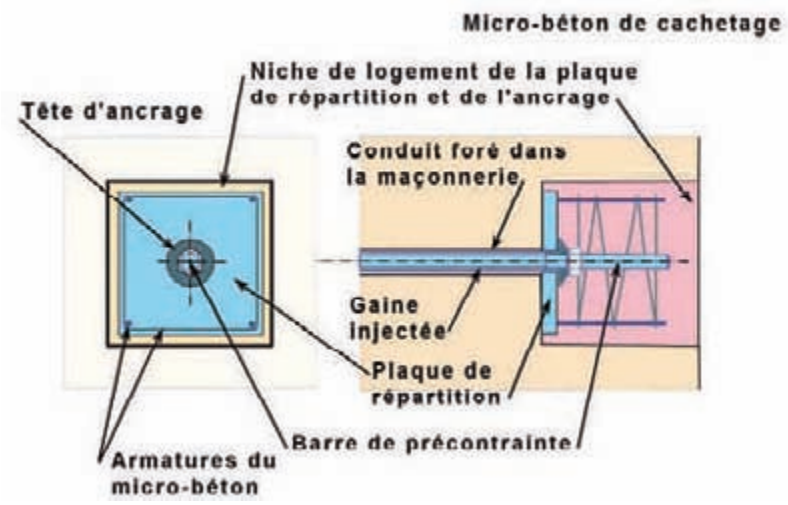

Micro-béton de cachetage
Niche de logement de la plaque de répartition et de l'ancrage
Tête d'ancrage
Conduit foré dans la maçonnerie
Gaine injectée
Plaque de répartition
Barre de précontrainte
Armatures du micro-béton

***Figure n° 41 : schéma d'une tête d'ancrage avec plaque de répartition***

## 4.4.8 LES ARMATURES COMPOSITES

> **Les armatures composites étant non-corrodables, il est possible de les utiliser dans la réparation et/ou le renforcement des structures en maçonnerie, à condition de tenir compte de leurs propriétés particulières résumées ci-après. Ces armatures se présentent :**

- sous forme de barres crénelées ou non, comme **les armatures de béton armé ;**
- sous forme de câbles, comme **les unités de précontrainte** mais avec des ancrages spécifiques,

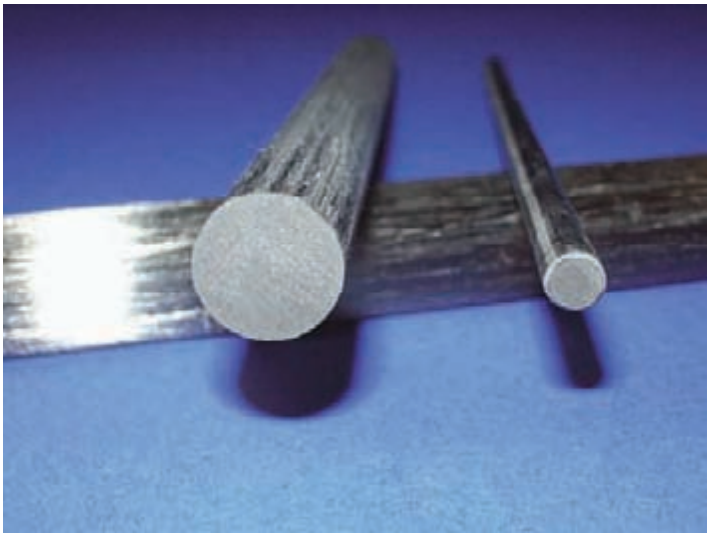


***Photo n° 47 : armatures en composites pour béton armé*** *(crédit photo Freyssinet)*

***NOTA :*** *les plaques (pultrudés) ou les tissus composites peuvent être utilisées comme armatures extérieures collées pour* ***certaines réparations et/ou renforcements*** *de maçonneries autres que les tirants, boulons et broches, en particulier pour renforcer les maçonneries vis-à-vis des actions sismiques.*

Les composites sont constituées de fibres (verre, carbone…) enrobées dans une matrice à base de polymères (résines époxydes, polyesters, phénoliques…). Ces produits présentent **une rupture fragile,** en ce sens qu'ils ne présentent pas de palier plastique (leur limite d'élasticité est confondue avec leur contrainte de rupture).

***ATTENTION,*** *les caractéristiques mécaniques des composites sont nettement moins élevées que celles des fibres à cause de la présence (indispensable) de la matrice de liaison.*

Toutes les armatures proposées par les fabricants ne garantissent pas **une adhérence** comparable à celle des armatures en acier à haute adhérence. Certaines armatures doivent recevoir un traitement pour avoir un état de surface permettant, soit un ancrage dans le béton, soit un scellement par un mortier à base de résines. D'autres armatures ont un coefficient de forme qui leur permet d'être scellées, comme des armatures en acier à haute adhérence.

**Les caractéristiques** des armatures composites, comme tous les produits organiques, **diminuent avec le temps et aussi en fonction du milieu** avec lequel ils sont en contact.

**En cas d'incendie,** dès que leur température dépasse environ 80°C, leurs caractéristiques mécaniques peuvent fortement diminuer. Cette température limite (température de transition vitreuse) dépend de la nature du polymère de la matrice.

Pour une première approche dans le domaine de la réparation et du renforcement de la maçonnerie, il est possible de s'appuyer sur **les recommandations de juin 2007 de l'AFGC**. Ce guide explicite, d'une part, **les propriétés de ces produits** et, d'autre part, **les principes de calcul,** lorsqu'ils sont utilisés sous forme de tissus ou plaques ou de tissus comme **armatures extérieures de béton armé.** Le cas des maçonneries n'est pas traité dans ces recommandations.

## 4.4.9 CONDUITS ET GAINES

Les conduits et gaines utilisés en précontrainte par post-tension peuvent être employés pour y loger des tirants passifs métalliques ou composites… C'est la raison pour laquelle un article spécifique leur est consacré.

**Le choix du type de conduit** doit également prendre en compte la nature de l'armature et celle du produit destiné à la sceller dans le conduit et/ou à la protéger contre les divers agents agressifs extérieurs.

Les armatures peuvent aussi être disposées sans gaine dans **un conduit foré dans la maçonnerie.** Dans un tel cas, il est indispensable d'utiliser des armatures non corrodables.

**> Normes européennes :**

- **NF EN 523 :** Gaines en feuillard d'acier pour câbles de précontrainte – Terminologie, prescriptions, contrôle de qualité,
- **NF EN 524-1 à 6 :** Gaines en feuillard d'acier pour câbles de précontrainte – Méthodes d'essai ;

**> Normes françaises :**

- **NF EN 12201-1, NF EN 12201-2 et NF EN 12201-5,** normes relatives aux tubes en polyéthylène haute-densité (PEHD),
- **NF EN 12201-3 :** Systèmes de canalisations en plastiques pour alimentation en eau – Polyéthylène (PE) – Partie 3 : raccords,
- **NF EN 10305-3, NF EN 10216-1, NF EN 10217-1 et NF EN 10219,** normes relatives aux tubes métalliques.

**> Conditions d'utilisation des différentes sortes de conduits et gaines :**

- **Cas des conduits et gaines de précontrainte intérieure** (chapitre 10 du **fascicule 65 du CCTG**) :

  - **les conduits métalliques,** c'est-à-dire les gaines en feuillard d'acier - même s'il s'agit de gaines de catégorie 2 (gaines rigides en feuillard cintrables à la main) - et les tubes d'acier laminé soudés cintrables sur machine **sont très sensibles à la corrosion,**

  - **les gaines en matière plastique,** lorsque l'ATE le prévoit, peuvent être utilisées en atmosphère corrosive pour l'acier, mais ne doivent pas être exposées aux rayonnements ultra-violets ;

Ces deux types de conduits peuvent être utilisés pour **les ouvrages en maçonnerie,** sous réserve qu'ils soient placés dans un béton ou mortier sous un enrobage capable de les protéger pour **la durée vie exigée par le marché.**

- **Cas des conduits de précontrainte extérieure** (chapitre 11 du **fascicule 65 du CCTG**) :

  - **les conduits en polyéthylène à haute densité (PEHD) sont normalement utilisables.** Il s'agit des tubes de type PE 80 et PE 100 du **groupe 4** (applications industrielles) accompagnés des documents de traçabilité ou du **groupe 2** (eau potable) selon l'identification de **l'AFNOR NF 114**. Les tubes, suivant leurs conditions d'utilisation appartiennent, soit à la **série basse pression** (PN=0,63 MPa : cas des PE 80 et PE 100), soit à la série pression (PN=1 MPa : cas des PE 80 et PE 100),

  - **les conduits en acier étant sensibles à la corrosion,** ils doivent être protégés efficacement contre la corrosion. En cas de recours à un acier inoxydable, il doit être compatible avec l'armature placée à l'intérieur du tube (absence de couple bimétallique) et avec le remblai (absence de produits nocifs).

  - **les conduits en matière plastique** non susceptible de libérer des radicaux chimiques agressifs tels que des chlorures, **ou en résine armée de fibres (verre…) peuvent être également employés sur avis technique d'un organisme spécialisé (cf. le fascicule 65).**

# 4.4.10 ACIERS DE CONSTRUCTION

## 4.4.10.1 Généralités

**> La réalisation des tirants d'enserrement passifs peut faire appel aux aciers de construction sous forme de :**

- **barres** pour les tirants dont les extrémités sont filetées pour permettre une légère mise en tension par serrage d'écrous ;

- **pièces mécano-soudées** pour les dispositifs d'ancrage et les plaques de répartition comme les croix de Saint-André…

**Ces différents dispositifs** peuvent être réalisés **en acier de construction** revêtu par un système de protection contre la corrosion, **en acier de construction à résistance améliorée vis-à-vis de la corrosion** (attention aux conditions d'environnement, ils ne sont pas à exclure en présence de chlorures) ou **en acier inoxydable.**

**La réalisation des pièces d'ancrages et des plaques de répartition** peut aussi faire appel **aux aciers moulés de construction** avec une protection contre la corrosion, voire à **des aciers moulés inoxydables.**

## 4.4.10.2 Textes de référence

**> Parmi les textes de référence, il est possible de citer le titre III du fascicule 4 du CCTG et le guide du SETRA de mars 2001 :**

**La commande des aciers laminés pour constructions métalliques** est régie par **le titre III du fascicule 4 du CCTG de septembre 2000** qui s'applique, d'une part, **aux ouvrages d'art et bâtiments exceptionnels** et, d'autre part, **aux bâtiments courants.** Pour le domaine du bâtiment, ce fascicule complète le **DTU 32.1.**

**Les références normatives** de ce texte ne sont pas toutes à jour ; en particulier, la norme **NF EN 10113** a été remplacée par les normes **NF EN 10025-2** et **NF EN 10025-3** et la norme **NF EN 10155** par la norme **NF EN 10025-5.**

***ATTENTION :*** *les références normatives des annexes A1, contractuelle, et B1, non contractuelle, ne sont pas à jour.*

**Le guide du SETRA de mars 2001 : Travaux de construction des ponts en acier - Guide du maître d'œuvre,** donne de précieux conseils sur le choix des aciers de construction.

## 4.4.10.3 Les principales normes relatives aux aciers de construction d'usage général et/ou soudables

### 4.4.10.3.1 Généralités

**> Il s'agit des normes listées dans le titre III du fascicule 4 mis à jour (cependant, les aciers thermomécaniques trop performants pour les applications du présent guide n'ont pas été retenus).**

- **NF EN 10025-1 :** Produits laminés à chaud en aciers de construction – Partie 1 : conditions techniques générales de livraison ;
- **NF EN 10025-2 :** Produits laminés à chaud en aciers de construction – Partie 2 : conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés ;

- **NF EN 10025-3 :** Produits laminés à chaud en aciers de construction – Partie 3 : conditions techniques de livraison pour les aciers de construction soudables à grains fins à l'état normalisé/laminage normalisé (remplace la norme **NF EN 10113) ;**
- **NF EN 10025-5 :** Produits laminés à chaud en aciers de construction – Partie 5 : conditions techniques de livraison pour les aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique (remplace la norme **NF EN 10155) ;**
- **NF A 35-503 :** Produits sidérurgiques – Aciers pour galvanisation par immersion à chaud.

#### 4.4.10.3.2 Autres normes

- **NF EN 10060 :** Ronds laminés à chaud - Dimensions et tolérances sur la forme et les dimensions (remplace la norme **NF A 45-003) ;**
- **NF A 45-001 :** Produits sidérurgiques – Barres laminées à chaud ou laminés marchands d'usage général – Tolérance sur forme et dimensions.

### 4.4.10.4 Nuances et qualités conseillées pour les aciers de construction

Ces aciers sont utilisables dans le cadre du présent guide (le tableau est inspiré de **l'annexe B1 du titre III du fascicule 4 du CCTG** tenant compte des références normatives mises à jour) :

| Normes | Nuances | Qualités requises |
|---|---|---|
| **NF EN 10025-2 Aciers de construction d'usage général** | S 235 et S 275 | J0 et J2G3 |
| **NF EN 10025-3 Aciers de construction soudables** | S 275 | N |
| **NF EN 10025-5 Aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion** | | WP interdite pour les ponts |
| | S 235 W | J0 et J2 |

***Tableau n° 11 : aciers de construction***

### 4.4.10.5 Les principales normes relatives aux aciers inoxydables

- **FD A 35-570 :** Nuances françaises d'aciers inoxydables d'usage général ne figurant pas dans **l'EN 10088 parties 2 et 3 ;**
- **NF EN 10088-1 :** Aciers inoxydables – Partie 1 : liste des aciers inoxydables ;
- **NF EN 10088-2 :** Aciers inoxydables – Partie 2 : conditions techniques de livraison des tôles et bandes en acier de résistance à la corrosion pour usage général ;

- **NF EN 10088-3 :** Aciers inoxydables – Partie 3 : conditions techniques de livraison pour les demi-produits, barres et fil machine, fils tréfilés, profils et produits transformés à froid en acier résistant à la corrosion d'usage général ;
- **NF EN 10088-4 :** Aciers inoxydables – Partie 4 : conditions techniques de livraison des tôles et bandes en acier en acier résistant à la corrosion pour usage de construction ;
- **NF EN 10088-4 :** Aciers inoxydables – Partie 4 : conditions techniques de livraison pour les barres, fils tréfilés, profils et produits transformés à froid en acier résistant à la corrosion pour usage de construction ;
- **NF A 47-402 :** Produits sidérurgiques – Produits longs en acier inoxydable transformés à froid – Dimensions, tolérances et qualité de surface ;

### 4.4.10.6 Les principales normes relatives aux aciers moulés

- **NF EN 10340 :** Aciers moulés de construction ;
- **NF EN 10283 :** Aciers moulés résistant à la corrosion.

## 4.4.11 LES PRODUITS D'ASSEMBLAGE

**> Il convient de se reporter aux normes en vigueur et aux trois textes de référence suivants :**

- **le fascicule 66 du CCTG :** exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier ;
- **le DTU 32.1 :** construction métallique : charpente en acier ;
- **Travaux de construction des ponts en acier : guide du maître d'œuvre (SETRA** mars 2001).

### 4.4.11.1 Les boulons d'assemblage de tous types

**> Les principales normes applicables à tous les types de boulons sont les suivantes :**

- **PrNF EN ISO 10684 :** Éléments de fixation – Revêtements de galvanisation à chaud ;
- **NF EN ISO 898-1 :** Caractéristiques mécaniques des éléments de fixation en acier au carbone et en acier allié – Partie 1 : boulons et vis ;
- **NF EN ISO 1461 :** Revêtement par galvanisation à chaud sur produits ferreux finis- Spécifications et méthodes d'essai ;
- **NF EN 20898-2 :** Caractéristiques mécaniques des éléments de fixation – Partie 2 : écrous avec charges d'épreuve spécifiées – Filetage à pas gros.

## 4.4.11.2 Les boulons ordinaires (non précontraints)

Les caractéristiques de ces boulons sont fixées par la norme **NF EN 20898 :** ils sont utilisables pour les assemblages non précontraints. Pour les ponts, ils ne sont pas utilisables pour l'assemblage d'éléments participant à la résistance ou la stabilité de l'ossature. Les boulons non précontraints peuvent bénéficier **de la marque NF 070** (fusion des référentiels 070 et 273).

**> Normes complémentaires :**

- **NF EN ISO 4032 :** Écrous hexagonaux, style 1 – Grades A et B ;
- **NF EN ISO 4017 :** Vis à tête hexagonale entièrement filetées - Grades A et B ;
- **NF EN ISO 4014 :** Vis à tête hexagonale partiellement filetées - Grades A et B ;
- **NF EN ISO 4042 :** Éléments de fixation – Revêtements électrolytiques.

## 4.4.11.3 Les boulons à serrage contrôlé (dits à haute résistance dans l'Eurocode 3)

Pour les ponts, ils doivent être **de classe 10.9** et conformes aux dispositions **du titre IV du fascicule 4 du CCTG.**

**> Se reporter aux trois normes en vigueur :**

- **NF E 27-701 :** Boulons à serrage contrôlé destinés à l'exécution des constructions métalliques – Spécifications techniques – Conditions de commande, de contrôle et livraison ;
- **NF E 27-702 :** Boulons à serrage contrôlé destinés à l'exécution des constructions métalliques – Essais d'aptitude à l'emploi des boulons ;
- **NF E 27-711 :** Boulons à serrage contrôlé destinés à l'exécution des constructions métalliques – Boulons à tête hexagonale – Dimensions et tolérances.

***ATTENTION :*** *cette série de normes va être remplacée par la norme* ***NF EN 14399 parties 1 à 10 (cf. ANNEXE 1 [FABEM 6.4]).***

- **NF E 25-812 :** Boulonnerie de construction à haute résistance apte à la précontrainte – Système HRC – Boulons à précontrainte calibrée.

Les boulons à serrage contrôlé peuvent bénéficier de la **marque NF 070.**

### 4.4.11.4 Les produits d'apport pour soudage

**> Se reporter au fascicule 66 du CCTG et aux normes en vigueur suivantes :**

- **NF EN ISO 2560 :** Produits consommables pour le soudage – Électrodes enrobées pour le soudage manuel à l'arc des aciers non alliés et des aciers à grains fins – Classification (remplace la norme **NF A 81-309**) ;
- **NF EN 757 :** Produits consommables pour le soudage – Électrodes enrobées pour le soudage manuel à l'arc des aciers à haute résistance – Classification (remplace la norme **NF A 81-340**) ;
- **NF EN ISO 17632 :** Produits consommables pour le soudage – Fils-électrodes fourrés pour soudage à l'arc avec ou sans gaz de protection des aciers non alliés et des aciers à grains fins – Classification (remplace la norme **NF A 81-350**).

## 4.4.12 LES PRODUITS ET SYSTÈMES DE PROTECTION DES ARMATURES CONTRE LA CORROSION ET LES AUTRES AGRESSIONS

### 4.4.12.1 Protection des broches constitués par des armatures de béton armé scellées dans la maçonnerie

Les armatures de béton armé **qui ne sont pas en acier inoxydable ou en composite** doivent être protégées contre la corrosion, soit par **galvanisation à chaud** (se reporter au **fascicule 56 du CCTG**), soit par la mise en œuvre **d'un système de protection.** Ce système doit être conforme aux dispositions de la norme **NF EN 1504-7 :** Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Partie 7 : Protection contre la corrosion des armatures (se reporter au **guide FABEM 1).**

En sus, ces armatures doivent être protégées par un enrobage de coulis, mortier ou béton, d'une épaisseur permettant d'assurer, d'une part, **la passivation de l'armature** durant la durée de vie souhaitée de la réparation et/ou du renforcement et, d'autre part, **le scellement de l'armature.** Il est possible d'utiliser **un produit à base de ciment** conforme à la norme **NF EN 1504-6 :** Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Partie 6 : Ancrage des armatures en acier, **sous réserve de s'assurer de sa compatibilité** (quantité d'alcalins) **avec la maçonnerie** pour éviter la formation d'efflorescences.

## 4.4.12.2 Protection des barres utilisées pour la réalisation de boulons ou de tirants d'enserrement passifs

Ces armatures sont disposées, soit dans un conduit foré dans la maçonnerie, soit dans une gaine ou un tube disposé dans un forage réalisé au travers de la maçonnerie ou du remblai. Sauf dans le cas où l'armature est constituée par un acier inoxydable performant, elle doit être protégée contre la corrosion.

**> Plusieurs solutions sont envisageables :**

- une protection de surface par galvanisation ou par application d'un système de protection, complétée par l'injection du conduit par un coulis de ciment. Il est possible d'utiliser un coulis d'injection de conduits de précontrainte (se reporter à l'article relatif à ces coulis ci-après) ;
- une protection de surface par galvanisation complétée par l'injection d'une cire pétrolière utilisée pour l'injection des conduits de précontrainte. Cette seconde solution permet le démontage et le remplacement de l'armature.

***ATTENTION :*** *des dispositions doivent être prises pour que la protection concerne aussi la ou les deux extrémités du tirant qui se trouvent à l'extérieur ou enchâssées dans la maçonnerie.*

Dans le cas de l'utilisation de barres en acier inoxydable, en l'absence d'un tube de protection étanche et scellé dans la maçonnerie, l'injection du conduit est également préférable car le conduit risque de servir, si l'étanchéité devient défaillante, de drain aux eaux d'infiltration en entraînant, dans le temps, des dégradations dans toute la maçonnerie. Dans le cas où l'armature reste libre, il faut s'assurer que des phénomènes d'aération différentielle, préjudiciable à l'armature, ne risquent pas de se produire. L'utilisation d'un produit souple pour l'injection permet le démontage et le remplacement de l'armature si besoin est.

Dans le cas ou la gaine ou le tube ne remplit pas complètement le conduit foré, il faut prévoir l'injection du vide par un coulis à base de ciment pour éviter le phénomène du drain (se reporter à la 3ème partie du présent guide qui traite de la formulation des coulis pour l'injection de la maçonnerie).

Pour ces injections, il est aussi possible d'utiliser un coulis d'injection de conduits de précontrainte ou un coulis d'injection conforme à la norme **NF EN 1504-5 :** Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Partie 5 : Injection du béton, mais il y lieu de s'assurer de l'absence d'incompatibilité entre la maçonnerie et le coulis.

## 4.4.12.3 Protection des armatures de précontrainte (barres ou câbles)

Ces armatures actives sont disposées, soit dans un conduit foré dans la maçonnerie, soit dans une gaine ou un tube disposé dans un forage réalisé au travers de la maçonnerie ou du remblai. Elles doivent être protégées contre la corrosion et, dans la mesure du possible, démontables.

**> Plusieurs solutions sont envisageables :**

- utilisation de torons gainés protégés déposés dans une gaine en PEHD injectée au coulis de ciment avant mise en tension des torons ;
- utilisation de câbles ou de barres avec injection des conduits par une cire pétrolière.

Se reporter au nouveau **fascicule 65 du CCTG** qui précise des exigences liées la protection contre la corrosion et les différentes solutions de protection ainsi qu'au **guide AFGC** sur la durabilité de la précontrainte. **Le fascicule 65** déconseille l'utilisation des graisses[13].

***ATTENTION :*** *des dispositions doivent être prises pour que la protection concerne aussi les deux têtes d'ancrage qui se trouvent à l'extérieur ou enchâssées dans la maçonnerie.*

Dans le cas de l'utilisation de barres en acier inoxydable, en l'absence d'un tube de protection étanche et scellé dans la maçonnerie, l'injection du conduit est également préférable, car le conduit risque de servir, si l'étanchéité devient défaillante, de drain aux eaux d'infiltration en entraînant, dans le temps, des dégradations de la maçonnerie. Dans le cas ou l'armature reste libre, il faut s'assurer que des phénomènes d'aération différentielle, préjudiciable à l'armature, ne risquent pas de se produire. L'utilisation d'un produit souple pour l'injection permet le démontage et le remplacement de l'armature, si besoin est.

Dans le cas où la gaine ou le tube ne remplit pas complètement le conduit foré, il faut prévoir l'injection du vide par un coulis à base de ciment pour éviter le phénomène du drain (se reporter à la 3ème partie du présent guide qui traite de la formulation des coulis pour l'injection de la maçonnerie).

Pour ces injections, il est aussi possible d'utiliser un coulis d'injection de conduits de précontrainte ou un coulis d'injection conforme à la norme **NF EN 1504-5 :** Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Partie 5 : Injection du béton, mais il y lieu de s'assurer de l'absence d'incompatibilité entre la maçonnerie et le coulis.

[13] *La graisse a une fâcheuse tendance à ressuer par temps chaud, ce qui provoque des écoulements d'huile fort peu esthétiques. L'usage des graisses est donc déconseillé.*

### 4.4.12.4 Protection des armatures composites

Dans le cas de l'utilisation d'armatures composites, l'injection des conduits par un produit souple est préférable car les conduits risquent de servir de drain aux eaux de ruissellement entraînant, dans le temps, des dégradations de la maçonnerie. De plus, des précautions doivent être prises pour protéger les ancrages des rayonnements UV. Enfin, les vides entre les conduits forés et les gaines ou les tube doivent être injectés. Là encore, il y a lieu de s'assurer qu'il n'y a pas incompatibilité entre le produit de protection et la maçonnerie mais aussi entre ce produit et le **composite** (par exemple, les alcalins du ciment attaquent le verre).

## 4.4.13 PRODUITS ET SYSTÈMES DE PRODUITS DE SCELLEMENT ET DE CALAGE

**Il est nécessaire de sceller les armatures passives** (armatures de béton armé, voire armatures composites) qui servent à l'épinglage des maçonneries.

**Les produits de scellement** peuvent être choisis parmi les produits et systèmes de produits qui répondent aux exigences de la norme européenne **NF EN 1504-6 :** Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Partie 6 : Ancrage des armatures en acier.

Pour les armatures en acier, est préférentiellement (protection contre la corrosion) utilisé un produit ou un système de produits à base de ciment, sous réserve de s'assurer de sa **compatibilité** (quantité d'alcalins) **avec la maçonnerie** pour éviter la formation d'efflorescences…

Pour les armatures en composite, un produit ou un système de produits à base de résines synthétiques semble mieux adapté pour éviter des réactions de type saponification.

> ***Rappel :*** *les chevilles pour béton visées à l'article 4.4.2 ci-dessus relèvent de* ***l'ATE n°001.***

**Il est nécessaire de caler les dispositifs d'ancrage** des tirants d'enserrement sur la maçonnerie de façon à répartir uniformément les contraintes exercées sur celle-ci et éviter les éclatements et les épaufrures…

En l'absence de norme européenne traitant du sujet, les produits de calage doivent être conformes aux exigences la norme française **XP P 18-821** (Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage et de scellement à base de liants hydrauliques - Caractères normalisés et garantis) et à celles de la norme **XP P 18-822** (Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage et de scellement à base de résines synthétiques - Caractères normalisés et garantis).

Ces produits de calage font l'objet de la **marque NF : Produits spéciaux construction béton** régie par le **règlement NF 030.**

Il y cependant lieu de s'assurer de l'absence d'incompatibilité entre la maçonnerie et le produit de calage.

***NOTA :*** *ces deux normes font l'objet d'une révision pour éliminer les clauses sur les produits de scellement.*

## 4.4.14 BFUP (bétons fibrés à ultra-hautes performances)

De tels produits peuvent être utilisés pour réaliser des plaques de répartition à disposer sous les ancrages de barres ou de câbles de précontrainte utilisés comme tirants d'enserrement… **Consulter les recommandations provisoires de janvier 2002 du SETRA et de l'AFGC.**

## 4.4.15 MATÉRIAUX DE REMBLAI

Se reporter à la 6ème partie du guide FABEM 6.2.

# 4.5.1 GÉNÉRALITÉS

Les obligations générales de **l'entrepreneur** concernant la mise à disposition et l'usage des matériels nécessaires aux travaux figurent dans le **paragraphe 5.8 du guide FABEM 6.1.** Les caractéristiques particulières que doivent présenter les matériels utilisés dans les travaux de boulonnage, brochage et enserrement sont développées ci-après.

# 4.5.2 MATÉRIELS NÉCESSAIRES À LA MISE EN PLACE DE BOULONS D'ANCRAGE, DE BROCHES ET DE TIRANTS D'ENSERREMENT

## 4.5.2.1 Généralités

**L'entrepreneur** propose à l'acceptation du maître d'œuvre le matériel qu'il compte utiliser.

**> Les matériels décrits dans le présent paragraphe sont les suivants :**

- les matériels pour le relevé géométrique et l'implantation ;
- les outils de taille des pierres ;
- les matériels de forage ;
- les matériels nécessaires à la mise en tension des divers types de renforts (barres, boulons…) ;
- les matériels nécessaires aux injections de scellement et de remplissage des forages…

## 4.5.2.2 Matériels de relevé et d'implantation

Il y a lieu de disposer des matériels permettant de relever la géométrie de l'ouvrage et d'implanter le tracé des forages destinés à recevoir les barres de BA, les boulons, les clous… Pour les ouvrages importants, à grande hauteur au–dessus du sol, le recours à un **géomètre** peut être nécessaire. **L'entrepreneur** propose à l'acceptation du **maître d'œuvre la procédure** de réalisation de cette opération et le matériel nécessaire en respectant et complétant, si besoin est, les dispositions du **marché**.

*Il est rappelé que, sauf dans le cas des grandes voûtes en forme d'arc, l'épaisseur réelle de la voûte est différente de la hauteur du bandeau. La détermination de cette épaisseur se fait avec l'aide de carottages dont l'interprétation est délicate, car la position de l'extrados est difficile à cerner.*

## 4.5.2.3 Outils pour la taille des pierres

**Des outils de taille des pierres** (ciseaux, bouchardes, poinçon ou broche, gradine…), qui s'adaptent, de nos jours, à des marteaux électriques ou pneumatiques à percussion, doivent être disponibles sur le chantier. Ils sont nécessaires, par exemple, pour rescinder des parties de maçonnerie, pour la finition lors de la création de **niches** pour y loger les ancrages, sachant que leur dégrossissage se fait à l'aide des **matériels de forage** cités ci-après.

***NOTA :*** *le site [http://ruedeslumieres.morkitu.org.] donne de précieuses informations historiques sur les carrières, les pierres naturelles, le matériel d'extraction, le matériel de taille, etc.*

## 4.5.2.4 Matériels de forage

Il est indispensable que les forages ne provoquent pas la désorganisation des pierres et des joints. De plus, la déviation de l'outil entre le point d'entrée et de sortie doit être minimale (centimétrique).

Il appartient au **marché** de fixer les tolérances d'exécution et de prévoir un **essai de convenance** pour tester le matériel. Le matériel de forage, sauf disposition contraire du **marché**, est proposé par **l'entrepreneur** à l'acceptation du **maître d'œuvre,** qui a lieu après un **essai de convenance.** Le **maître d'œuvre** s'assure que **l'entrepreneur** peut rapidement approvisionner d'autres types matériels de forage dans le cas ou l'essai ne serait pas satisfaisant.

**> Trois sortes de matériels peuvent être utilisées pour réaliser les forages au travers de la maçonnerie et/ou du matériau de remplissage (remblai) :**

- les outils pour forages destructifs ;
- les outils pour forages carottés ;
- les outils pour trous de faible diamètre.

| Méthode de forage | Avantages | Inconvénients |
|---|---|---|
| **Roto-percussion (marteau hors trou)** | Matériel léger | Diamètre de forage limité |
| | Prix modéré | Longueur de forage limitée |
| | Rapidité d'exécution | Importance des déviations surtout si le matériau est très hétérogène |
| | Injection d'air ou d'eau possible | Méthode agressives pour les ouvrages fragilisés |
| | Matériel courant | |
| **Roto-percussion (marteau fond de trou)** | Bon guidage grâce au train de tiges rigide | Forage à l'air obligatoire |
| | Prix modéré | Matériel lourd |
| | Grande rapidité d'exécution | Méthode agressives pour les ouvrages fragilisés |
| | Possibilité de tubage | |
| | Gros diamètre envisageable | |
| | Grande longueur possible sans perte de puissance | |
| **Rotation pure par (carottage)** | Peu ou pas de vibrations | Coût élevé |
| | Adapté aux parties de maçonnerie très fragile ou de grande valeur (monuments historiques) | Lenteur d'exécution |
| | Faible poids du matériel | Demande une grande maîtrise pour les forages longs |
| | Bon guidage de l'outil | |
| | Gros diamètre possible | |

***Tableau n° 12 : tableau comparatif des méthodes de forage dans la maçonnerie***

### 4.5.2.4.1 Les outils pour forages destructifs en roto-percussion ou roto-vibration[14]

Les outils pour forages destructifs peuvent provoquer des désordres plus ou moins importants suivant le procédé utilisé à cause des vibrations et des pressions exercées, de la circulation de l'air et du fluide de forage. Ils peuvent entraîner l'altération des joints et la désorganisation des pierres pouvant se déliter (ardoises, schistes, calcaires fragilisés par le gel…). En particulier, il faut ralentir fortement l'outil en fin de forage pour éviter création d'éclatements en forme de cônes lors de la sortie de l'outil.

Le choix d'un tel type d'outil impose une bonne connaissance de l'état de la maçonnerie qui doit être saine (pierres et joints).

**> Plusieurs méthodes de forages par roto-percussion ou roto-vibration sont envisageables :**

- **le forage au marteau roto-percuteur** situé sur la glissière de la machine (marteau dit hors-trou) :

Dans ce procédé, le marteau roto-percuteur est situé à l'extérieur du trou. Ce procédé peut conduire à des déviations importantes et certains risques de coincement, qui peuvent être réduits par l'utilisation de certaines formes d'outils taillants. Ce procédé peut être complété par un système de mise en place d'un tubage (métallique ou plastique ?) à l'avancement. Dans les deux cas, les sédiments sont évacués par la cheminée disponible entre le trou et, soit le train de tiges, soit le tubage.

[14] *Les forages au tricône, qui nécessitent une pression élevée et un fort couple de rotation sont totalement inadaptés au forage de la maçonnerie. De plus, de forts risques de déviation et de coincement de l'outil sont à redouter.*

La photo ci-après, illustrant un forage avec un marteau hors trou, montre la réalisation d'une engravure par forages multiples. La finition de l'engravure est à réaliser au moyen d'outils de taille des pierres manuels ou pneumatiques…

***Photo n° 48 : forage au marteau hors trou pour la création d'une niche*** *(crédit photo CETE de l'Ouest - Jacques Billon)*

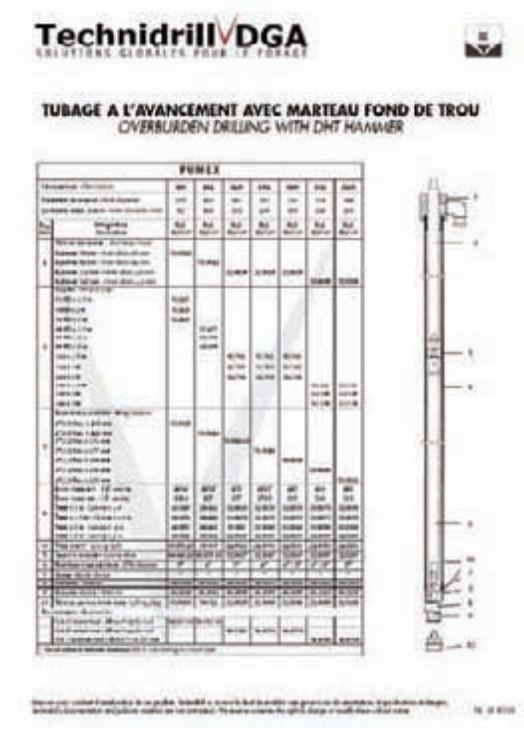


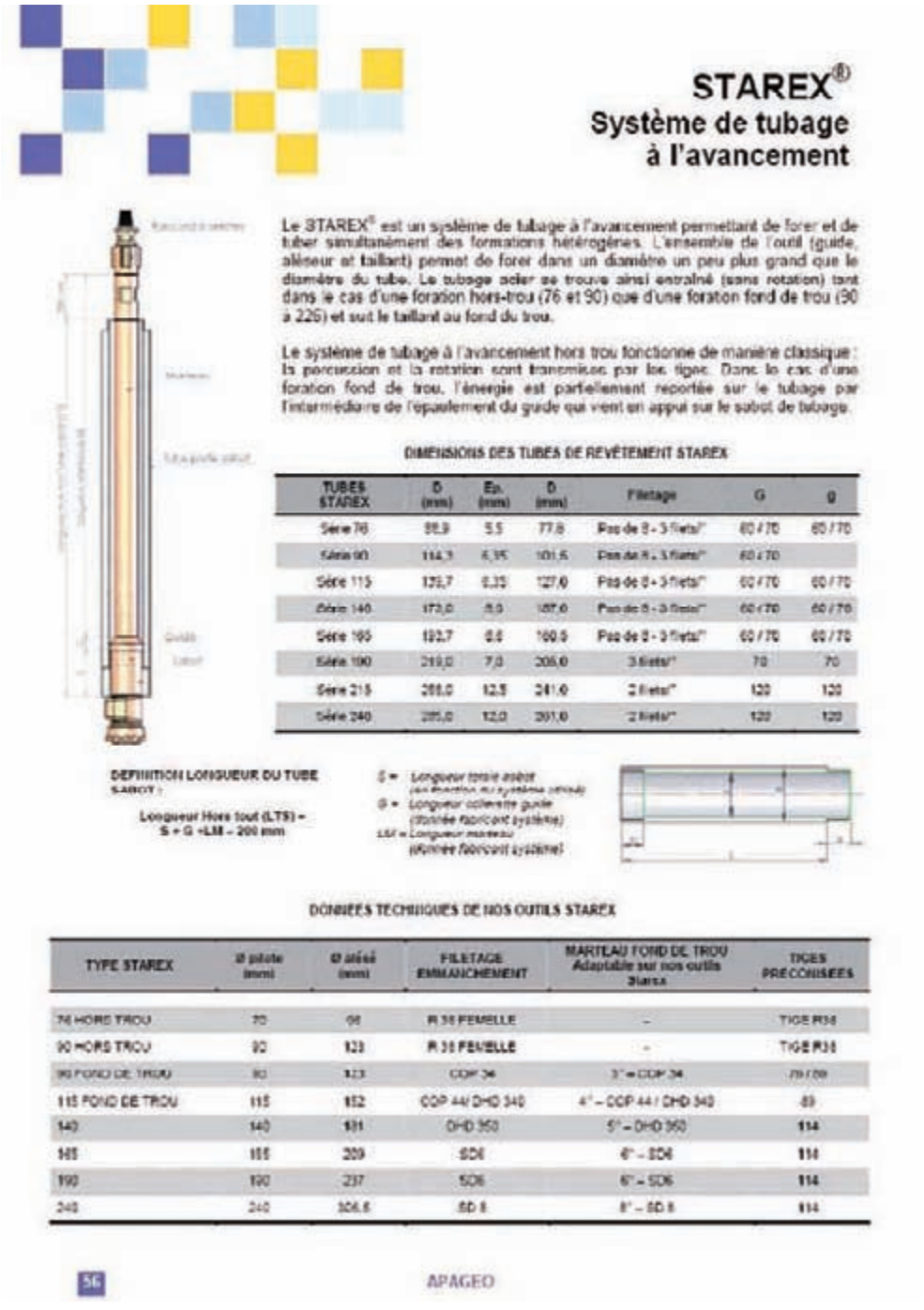

***Figure n° 42 : fiche technique avec le schéma d'un marteau fond de trou (extrait documentation Technidrill/DGA)***

***Photo n° 49 : forage dans le corps de voûte marteau hors trou*** *(crédit photo Cofex Littoral)*

- **le forage au marteau roto-percuteur** situé en fond de trou au contact de l'outil taillant (marteau dit fond de trou) :

Sous réserve d'avoir des tiges guides de forte section, peu flexibles, cette méthode permet de réduire les risques de déviation et donc d'obtenir des trous plus rectilignes que dans la première méthode. Ce procédé est également compatible avec la mise en place d'un tubage métallique ou plastique à l'avancement. Les sédiments sont évacués comme dans le cas précédent.

***NOTA :*** *ce type de matériel sert aussi à l'enfoncement des broches et des clous (se reporter à l'article relatif à leur mise en œuvre).*



STAREX®
Système de tubage à l'avancement

Le STAREX® est un système de tubage à l'avancement permettant de forer et de tuber simultanément des formations hétérogènes. L'ensemble de l'outil (guide, aléseur et taillant) permet de forer dans un diamètre un peu plus grand que le diamètre du tube. Le tubage acier se trouve ainsi entraîné (sans rotation) tant dans le cas d'une foration hors-trou (76 et 90) que d'une foration fond de trou (90 à 226) et suit le taillant au fond du trou.

Le système de tubage à l'avancement hors trou fonctionne de manière classique : la percussion et la rotation sont transmises par les tiges. Dans le cas d'une foration fond de trou, l'énergie est partiellement reportée sur le tubage par l'intermédiaire de l'épaulement du guide qui vient en appui sur le sabot de tubage.

DIMENSIONS DES TUBES DE REVÊTEMENT STAREX

| TUBES STAREX | D (mm) | Ep. (mm) | D (mm) | Filetage | G | g |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Série 76 | 88,9 | 5,5 | 77,8 | Pas de 8 - 3 filets/" | 60 / 70 | 60 / 70 |
| Série 90 | 114,3 | 6,35 | 101,6 | Pas de 8 - 3 filets/" | 60 / 70 | |
| Série 115 | 139,7 | 6,35 | 127,0 | Pas de 8 - 3 filets/" | 60 / 70 | 60 / 70 |
| Série 140 | 168,3 | 8,0 | 152,0 | Pas de 8 - 3 filets/" | 60 / 70 | 60 / 70 |
| Série 165 | 193,7 | 8,0 | 169,5 | Pas de 8 - 3 filets/" | 60 / 70 | 60 / 70 |
| Série 190 | 219,0 | 7,0 | 205,0 | 3 filets/" | 70 | 70 |
| Série 215 | 268,0 | 12,5 | 241,0 | 2 filets/" | 120 | 120 |
| Série 240 | 285,0 | 12,0 | 261,0 | 2 filets/" | 120 | 120 |

DEFINITION LONGUEUR DU TUBE

Longueur Hors tout (LTS) = S + G +LM – 200 mm

S = Longueur tenon sabot
G = Longueur collerette guide (donnée fabricant système)
LM = Longueur manchon (donnée fabricant système)

DONNEES TECHNIQUES DE NOS OUTILS STAREX

| TYPE STAREX | Ø pilote (mm) | Ø alésé (mm) | FILETAGE EMMANCHEMENT | MARTEAU FOND DE TROU Adaptable sur nos outils Starex | TIGES PRECONISEES |
|---|---|---|---|---|---|
| 76 HORS TROU | 70 | 98 | R 38 FEMELLE | - | TIGE R38 |
| 90 HORS TROU | 90 | 123 | R 38 FEMELLE | - | TIGE R38 |
| 90 FOND DE TROU | 90 | 123 | COP 34 | 3" = COP 34 | 76 / 89 |
| 115 FOND DE TROU | 115 | 152 | COP 44/ DHD 340 | 4" – COP 44 / DHD 340 | 89 |
| 140 | 140 | 181 | DHD 350 | 5" – DHD 350 | 114 |
| 165 | 165 | 209 | SD6 | 6" – SD6 | 114 |
| 190 | 190 | 237 | SD6 | 6" – SD6 | 114 |
| 240 | 240 | 306,6 | SD 8 | 8" – SD 8 | 114 |

56 APAGEO

***Figure n° 43 : fiche technique d'un système de tubage à l'avancement*** *(extrait de la documentation STAREX - APAGEO)*

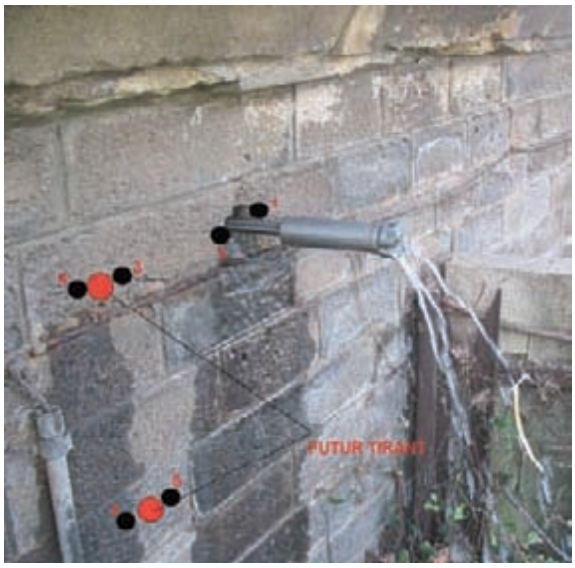



***Photo n° 50 : sortie du taillant*** *(crédit photo Cofex Littoral)*

**le forage à circulation inverse :**

Ce procédé, dit à circulation inverse, comporte un double train de tiges permettant de récupérer des éléments de carottes par le tube central creux. Ce procédé n'est pas utilisé pour la réalisation de forages au travers des maçonneries.

**les systèmes auto-foreurs :**

Certains fabricants proposent des systèmes avec des boulons d'ancrage ponctuels ou continus auto-foreurs, qui facilitent la mise en place de tels boulons. Un tel système comprend les ancrages, les matériels de forage de mise en tension et d'injection associés. La figure et la photo qui suivent illustrent un tel système.

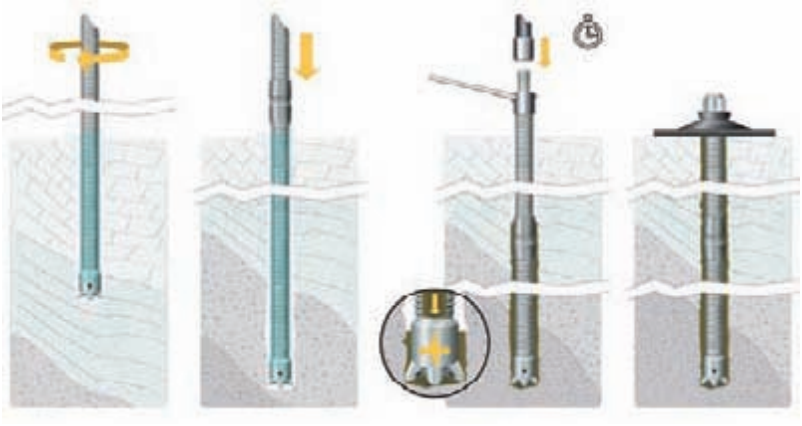


***Figure n° 44 : mise en œuvre d'un ancrage continu du système MAI*** *(crédit photo Atlas Copco)*

***Photo n° 51 : pompe d'injection du système MAI*** *(crédit photo Atlas Copco)*

### 4.5.2.4.2 Les outils pour forages carottés

Les forages au moyen de couronnes diamantées et outil carotteur sont utilisés obligatoirement lors de reconnaissance des maçonneries avant la réalisation des forages définitifs. Ils sont également recommandés pour réaliser les forages lorsque la maçonnerie est de qualité médiocre. La mise en place d'un tubage à l'avancement est également possible. La longueur du carottier peut être adaptée. Classiquement, sa longueur est de l'ordre du mètre. Il est possible d'avoir des carottier de grande longueur, jusqu'à environ 10 m, pour un meilleur guidage. Le forage commence avec un carottier de faible longueur puis, au fur et à mesure du forage, on utilise des carottiers de plus en plus longs.

***Photo n° 52 : carottage avec une couronne diamantée*** *(crédit photo D. Poineau)*

#### 4.5.2.4.3 Les outils pour forages de faible diamètre

Pour le scellement d'armatures de faible longueur et de faible diamètre, tel que le diamètre du trou ne dépasse pas 25 mm, il est possible d'utiliser un **perforateur équipé d'une mèche de forage.**

## 4.5.2.5 Matériels pour saignées ou engravures

**> Pour la réalisation des engravures ou saignées de forme circulaire, rectangulaire ou carrée destinées à la mise en place d'armatures, il est possible d'utiliser divers matériels tels que :**

- un outil de forage par roto-percussion ou roto-vibration ;
- un outil pour forages carottés ;
- une meuleuse électrique ou pneumatique portable équipée d'une lame diamantée ;
- une rainureuse équipée de deux lames diamantées (engravures rectangulaires) ;
- une scie équipée d'une lame diamantée montée sur un bâti métallique qui se translate sur un rail-guide… ;
- certains des outils destinés à la taille des pierres (ciseaux, poinçons, broches…).

***Photo n° 53 : meuleuse disqueuse et rainureuse*** *(crédit photo D. Poineau)*

## 4.5.2.6 Matériels pour l'inspection des forages

En cas de besoin et sous réserve de ne pas mettre en place de tubage à l'avancement, il est possible d'introduire dans le forage réalisé, soit un **endoscope rigide ou souple** dont la longueur d'exploration est réduite aux deux seules extrémités du forage, voire aux forages verticaux additionnels de recentrage, soit ce qui est plus performant, une **caméra vidéo,** qui permet de visionner l'état de la maçonnerie sur toute la longueur du forage.

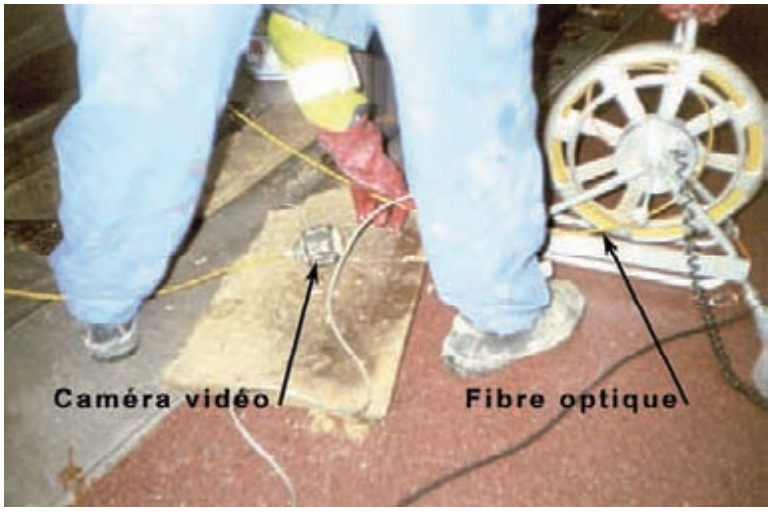



***Photo n° 54 : matériel de vidéo pour examen de canalisations et forages*** *(crédit photo D. Poineau)*

***Photo n° 55 : cabine d'enregistrement des images de la caméra vidéo*** *(crédit photo D. Poineau)*

### 4.5.2.7 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de calage

**Dans le cas des tirants d'enserrement passifs ou actifs,** il est nécessaire d'interposer un produit de calage (coulis ou mortier) entre la maçonnerie et les dispositifs d'ancrage ou la plaque de répartition.

**> Pour les produits de calage à base de liants organiques (résines époxydiques), la mise en place du primaire d'accrochage nécessite, suivant l'importance de la surface à traiter et les difficultés d'accès :**

- un pinceau ;
- ou une brosse ;
- ou un rouleau….

**> Les dispositifs d'ancrages ou les plaques de répartition devant être appliqués, le plus souvent, sur une paroi verticale ou quasi verticale, deux solutions sont possibles pour mettre en place le mortier de calage :**

- utiliser un mortier thixotrope appliqué manuellement à la truelle ;
- utiliser un coulis ou un mortier de consistance fluide pouvant être, soit coulé, soit injecté dans un coffrage. L'injection nécessite :
  - une pompe adaptée à la granulométrie du produit ;
  - ou un pot à pression.

Il est aussi possible de mettre en œuvre un **mortier sec** au moyen d'un **matoir**. Cette technique n'est plus guère utilisée. Elle nécessite, en effet, un exécutant ayant une grande expérience.

### 4.5.2.8 Matériels pour le serrage des écrous des armatures passives (barres)

Le serrage des écrous nécessite l'utilisation d'une clé dynamométrique.

### 4.5.2.9 Matériels pour la mise en tension des armatures de précontrainte

Les armatures de précontrainte de post-tension sont mises en tension au moyen de vérins en respectant les dispositions des chapitres 10 et 11 du **fascicule 65 du CCTG** et des clauses spécifiques du **marché**.

Il faut noter que les tirants d'enserrement dépassent rarement les 10 mètres de longueur (ce sont des armatures de faible longueur mais pas de très faible longueur), mais les déformations différées de la maçonnerie sont aléatoires et ne sont pas codifiées. **La procédure de mise en tension** doit être adaptée en conséquence, en s'inspirant de l'article consacré aux armatures de très faible longueur.

## 4.5.2.10 Matériels d'injection de scellement et de remplissage

**> Des injections sont à réaliser dans les cas suivants :**

- pour renforcer la maçonnerie avant de procéder à la réalisation des forages pour les épinglages ou les tirants d'enserrement (se reporter à la 3ème partie du présent guide relative à l'injection des maçonneries)… ;
- pour assurer le scellement des broches, des boulons d'ancrage (utilisation de produits de scellement à base de ciment ou de résines synthétiques) ;
- pour sceller les conduits des tirants d'enserrement (utilisation de coulis à base de ciment, voire de produits de scellement) et pour protéger les tirants d'enserrement passifs ou actifs contre la corrosion (utilisation de coulis à base de ciment, de cires pétrolières, voire, dans des cas particuliers, de graisses[15]).

Se reporter au **guide FABEM 3 relatif à l'injection des fissures….**

### 4.5.2.10.1 Matériel pour le scellement de barres de béton armé ou de barres lisses utilisées pour réaliser un brochage, un épinglage ou un boulonnage

**> Le nettoyage soigné des trous est effectué avec :**

- un écouvillon ;
- un jet d'air comprimé (déshuilé)…

**> Le produit de scellement doit remplir complètement le trou :**

- cas d'un scellement vertical sur une paroi horizontale ou faiblement inclinée : le produit, sous forme d'un **coulis**, est mis en place par simple gravité :
  - avec un seau et un entonnoir,
  - un pistolet manuel… ;
- cas d'un scellement sur une paroi verticale ou en sous-face : le produit, sous forme d'un **mortier** à consistance ferme, est mis en place avec un pistolet manuel ou pneumatique prévu pour cet usage…

[15] *La graisse a une fâcheuse tendance à ressuer par temps chaud ce qui provoque des écoulements d'huile fort peu esthétiques. L'usage des graisses est donc déconseillé.*

***Photo n° 56 : remplissage des trous avant scellement de barres*** *(crédit photo Parexlanko)*

***REMARQUE :*** *certains industriels proposent des* ***coffrets de scellement pour armatures de béton armé*** *comprenant des outils de nettoyage des trous (écouvillons, buses de nettoyage), des pistolets d'injections manuels ou pneumatiques équipés de flexibles, buses d'injection, ainsi que des cartouches contenant le produit de scellement.*

A ceci, il faut ajouter les **dispositifs** qui maintiennent l'armature en place pendant le durcissement du produit de scellement de façon qu'elle soit enrobée sur tout son périmètre.

### 4.5.2.10.2 Matériel pour le scellement des boulons d'ancrage et des broches prêts à l'emploi

Les fabricants disposent de matériels spécifiques pour réaliser les scellements et, en particulier, de pompes comme le montre la photo suivante. Cette pompe est utilisée ici pour le scellement de boulons d'ancrage auto-foreurs du système MAI avec un coulis à base de liants hydrauliques.

***Photo n° 57 : pompe d'injection du procédé MAI Systems ®*** *(crédit photo Atlas Copco)*

### 4.5.2.10.3 Matériel pour le scellement des conduits ou la protection de tirants d'enserrement

#### *4.5.2.10.3.1 Généralités*

**> Divers matériels sont utilisés pour préparer le produit d'injection et le mettre en œuvre :**

- les malaxeurs ;
- les pompes ;
- les autres matériels d'injection ;

Dans le cadre de la **procédure d'injection, l'entrepreneur** propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** le matériel qu'il compte utiliser dans le respect des dispositions du **marché**.

L'état et le bon fonctionnement du matériel doivent être contrôlés par **l'entrepreneur** qui s'assure également de la présence des fiches techniques et des carnets d'entretien, voire des procès-verbaux de tarage (manomètres, dispositifs de pesage…).

Il est souvent possible d'utiliser les matériels qui sont utilisés pour l'injection des conduits des câbles et barres de précontrainte.

#### *4.5.2.10.3.2 Cas des coulis à base de ciment*

**1) Malaxeurs :**

Les produits d'injection sont en général à base de plusieurs composants (par exemple, un mélange de liants hydrauliques et d'additions auquel il faut ajouter de l'eau ou un composant liquide, etc.). Il faut donc utiliser un **malaxeur** pour fabriquer le mélange qui sera ensuite introduit dans le matériel d'injection proprement dit.

Le mélange se fait, soit avec des malaxeurs à cuves tournantes et pales fixes, soit avec des agitateurs. Normalement la vitesse de rotation est limitée à quelques centaines de tours par minute pour éviter l'inclusion d'air dans le mélange. Certains malaxeurs fonctionnent sous vide pour éviter toute inclusion d'air. Pour le mélange de coulis à base de ciment, les pales sont de grandes dimensions.

**L'essai de convenance de préparation des produits** permet de choisir la meilleure forme d'hélice, la vitesse de rotation et la durée de l'opération.

**2) Pompes et autres matériels d'injection :**

**> Les matériels utilisés sont les suivants :**

- les pompes pour coulis d'injection ;
- les pots à pression ;
- les seringues et les pistolets.

**L'épreuve de convenance d'injection** permet de vérifier que le matériel d'injection réalise efficacement le scellement et le remplissage des conduits.

Les pots à pression, les seringues et les pistolets peuvent être utilisés pour injecter des faibles quantités de coulis.

### > Cas des pompes pour coulis d'injection

Ces pompes sont utilisées pour les injections des coulis à base de liants hydrauliques. Ces pompes doivent comporter un limitateur de pression. Le **fascicule 65 du CCTG** indique que la pression ne doit pas, normalement, dépasser 1,5 MPa.

### > Cas des pots à pression

Pour les injections de faibles quantités de produits, il est possible de faire appel à **un pot à pression.** Ce matériel d'injection fait appel à un récipient fermant hermétiquement et qui peut être mis en pression. Après mélange des composants, le récipient dans lequel se trouve le produit à injecter (c'est un emballage perdu) est introduit dans le pot à pression. La pression d'air chasse le produit dans les flexibles qui relient le pot à pression aux injecteurs. La capacité du pot à pression doit être adaptée à la durée d'utilisation du produit. Le pot à pression doit être muni d'un manomètre dont la fiche d'étalonnage date de moins de trois mois.

**Il s'agit d'appareils à pression de gaz qui doivent être contrôlés périodiquement par un organisme agréé.**

**Il existe plusieurs modèles de pots à pression :**

- pot à pression à sortie haute ;
- pot à pression à sortie basse ;
- pot à pression à réservoir indépendant ;
- pot à pression à enveloppe compressible.

La mise en pression du pot peut être effectuée avec une bouteille d'air comprimé ou avec une pompe à main.

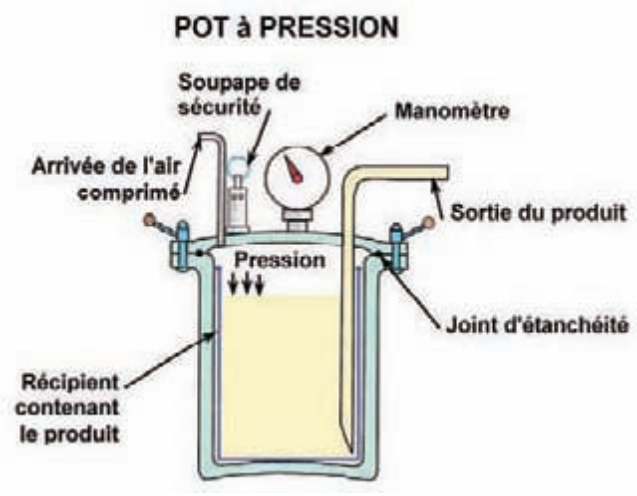



*Figure n° 45 : principe de fonctionnement d'un pot à pression*

**> Cas des seringues ou pistolets**

Pour les injections de très petites quantités de produit, il est souvent fait appel à des seringues ou des pistolets manuels qui contiennent le produit à injecter.

***Photo n° 58 : pistolet manuel d'injection*** *(crédit photo Freyssinet)*

### *4.5.2.10.3.3 Cas des produits d'injection souples*

La température d'injection d'une **cire pétrolière** est comprise entre 80° et 100°C. Dans le cas de la protection des tirants d'enserrement, les quantités à mettre en œuvre sont relativement réduites ; il n'est donc guère envisageable de recourir à l'utilisation de camions spécialement équipés pour maintenir la bonne température et injecter la cire.

Les produits sont donc livrés en fût sur le chantier et un dispositif de chauffage doit être prévu. **L'entrepreneur** propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** le dispositif de chauffage et le matériel d'injection dans le cadre de la **procédure** d'injection, qui doit respecter les dispositions du chapitre 14 du **fascicule 65 du CCTG** et les clauses du **marché**.

# 4.6.1 RÉALISATION DES TRAVAUX DE BOULONNAGE

## 4.6.1.1 Généralités

***Rappels :*** *le boulon est un organe de fixation permettant, par sa mise en traction, l'assemblage par mise en compression d'un ensemble d'éléments plus ou moins instables.*

*Il fonctionne de façon ponctuelle. Il lui faut donc, à ses deux extrémités, un matériau suffisamment résistant pour lui permettre de s'y ancrer. La partie ancrage est constituée, soit d'un dispositif à expansion qui s'écarte en augmentant son diamètre au fur et à mesure du vissage lors de la mise en traction de la tige , soit par scellement d'une partie réduite de sa longueur par un coulis à base de liants hydrauliques modifiés ou non ou par un produit de scellement à base de résines synthétiques.*

**Le boulon** s'apparente, par bien des aspects, **au tirant d'ancrage.** Sa désignation restera utilisée lorsqu'il s'agit de barres de longueur relativement courte.

Dans le domaine des ouvrages d'art en maçonnerie, le terme de **«tirant»** est réservé aux barres traversantes (avec leurs deux ancrages sur les faces extérieures de la structure à consolider), alors que celui de **«boulon»** est utilisé pour les ancrages internes à la maçonnerie.

***Rappel : le marché*** *peut imposer le choix de boulons en acier inoxydable ou en matériaux composites, ce qui permet d'espérer une plus longue durabilité de la réparation et/ou du renforcement.*

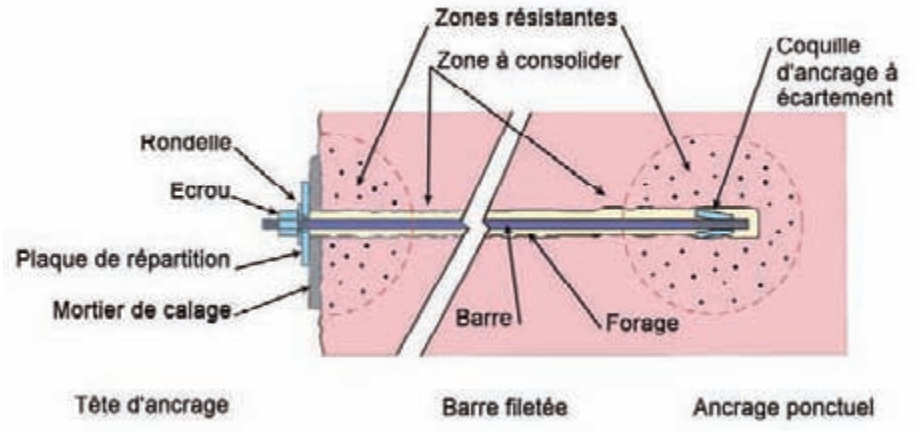



***Figure n° 46 : schéma d'un boulon d'ancrage avec ses 3 parties***

**> Mode de fonctionnement :**

Le fonctionnement d'un **boulon d'ancrage** est fondamentalement différent de celui d'une **broche**, puisque le boulon travaille en traction entre deux ancrages ponctuels, alors que la broche travaille au frottement, sur toute sa longueur.

**> Détermination du type de boulon :**

Le boulon d'ancrage est déterminé par le projeteur en fonction de plusieurs paramètres, en particulier de l'effort de poussée à reprendre :

- le type de boulon (suivant les recommandations techniques du fabricant) ;
- le diamètre du forage (fonction des dimensions du dispositif d'ancrage) ;
- la nature et la qualité des matériaux au travers desquels le forage doit être exécuté (il est recommandé de procéder à un sondage de reconnaissance dans le cadre de **l'épreuve de convenance).** Ceci permet de préconiser la méthode de forage la mieux adaptée ;
- la qualité de l'environnement dans lequel il doit être mis en œuvre (agressivité des eaux, risque de courant électrique parasite…) ;
- l'utilisation éventuelle de sa tête d'ancrage pour l'accrochage d'éléments rapportés ;
- etc.

## 4.6.1.2 Préparation de l'opération

**> Lors de la préparation de l'opération sont effectués :**

- la mise en place des **cintres** ou des **étaiements** éventuellement nécessaires. Ces dispositifs doivent être conçus pour ne pas gêner les travaux de boulonnage et les autres travaux à exécuter ;
- la mise en place d'une plateforme de travail pouvant recevoir le poids de la foreuse, du personnel nécessaire à son maniement et aux contrôles, des accessoires, des matériaux, etc.,
- les travaux de dévégétalisation, de nettoyage ou de préparation de surface nécessaires ;
- le décaissement partiel ou total du matériau de remplissage en vue de son remplacement si cette opération est prévue au **marché**. Cette opération peut faciliter la mise en place des boulons destinés à la stabilisation des murs tympans, la réalisation des injections de confortement de la maçonnerie… ;

- certains travaux, tels que l'injection des maçonneries, qu'il est préférable de consolider avant les forages. Ces forages pouvant ensuite être utilisés aussi pour des injections complémentaires ;
- l'implantation des forages qui doivent être disposés, non sur le joint entre deux moellons, mais au milieu d'un moellon et à mi-épaisseur du bandeau ;
- l'amenée, la préparation et le réglage des matériels de forage, de mise en tension et d'injection ;
- la réalisation des **épreuves de convenance** prévues au **marché** et dans la **procédure d'exécution…**

*Il est rappelé que lors d'un décaissement, **l'enlèvement du remblai** doit être effectué en respectant scrupuleusement la **procédure** fixée par le **bureau d'études** sous peine de risquer **la décompression de la voûte** (se reporter à **l'annexe 2 [FABEM 6.4]** sur le mode de fonctionnement des voûtes). Les arcs brisés y sont particulièrement sensibles.*

## 4.6.1.3 Préparation des produits (injection, calage…)

Se reporter au paragraphe **5.9.3 du guide FABEM 6.1.**

## 4.6.1.4 Mise en place d'un boulon d'ancrage

**> La mise en œuvre d'un boulon nécessite les opérations suivantes :**

- le forage du trou ;
- le soufflage et nettoyage du trou ;
- la mise en place du boulon avec son dispositif d'ancrage à expansion ou par scellement ;
- la mise en place de la tête d'ancrage ;
- le serrage (mise en traction) manuel ou mécanique du boulon ;
- le blocage éventuel (suivant le type de boulon) ;
- l'injection éventuelle (en fonction du type de protection nécessaire) ;
- le cachetage (ou camouflage) éventuel de la tête d'ancrage ;
- etc.

**> Le forage du trou :**

***NOTE :*** *cette partie est quasiment commune aux trois techniques (boulons, broches et tirants).*

***ATTENTION*** *au délavage que provoque l'eau de forage, mais aussi aux pressions trop importantes qui peuvent se développer dans la maçonnerie, ce qui peut entraîner des désordres, notamment au niveau des joints et du hourdage intérieur, voire des ruptures.*

Il faut prévoir un dispositif permettant de **filtrer les eaux de forage** pour en retenir les éléments lourds et pouvoir les évacuer, sans risque de pollution de l'environnement.

***ATTENTION*** *à ne pas négliger ce point lorsque le chantier a fait l'objet d'une déclaration dite* ***«loi sur l'eau»****.*

Pour un boulon, le diamètre est déterminé en fonction du type d'ancrage choisi (se reporter à la fiche technique du fabricant). La **méthode de forage du trou** (roto-percussion ou carottage) est choisie en fonction de la nature et la qualité du matériau à perforer :

***Photo n° 59 : forage du bandeau et de la voûte au pont des Abarines*** *(crédit photo Cofex Littoral)*

■ **La roto-percussion avec marteau hors trou ou fond de trou. Cette méthode peut être utilisée lorsque la maçonnerie est suffisamment stable et homogène. Elle nécessite :**

- l'utilisation d'un appareil composé d'un marteau roto-percuteur adapté au diamètre du trou, d'un emmanchement, d'un train de tiges et d'un outil de forage du type :
  - burin monobloc,
  - taillant : à croix en acier traité ou à boutons de tungstène,
- l'utilisation d'une glissière de guidage (si la longueur du forage est supérieure à au moins 20 fois le diamètre du forage) correctement ancrée à la paroi,
- l'apport d'eau afin de faciliter l'élimination des produits de forage,
- la filtration de l'eau de forage afin d'éviter de rejeter certains produits dans l'environnement,
- la production d'une source d'énergie nécessaire au fonctionnement de l'outil de forage. Ce peut être :
  - l'air comprimé (produit par un compresseur),
  - l'énergie hydraulique (produite par pompe à huile),
  - l'énergie électrique (produite par un groupe électrogène).

■ **Le carottage. Cette méthode est recommandée lorsque le forage doit s'effectuer au travers d'une maçonnerie relativement fragilisée. Elle nécessite :**

- l'utilisation d'un carottier de diamètre extérieur adapté au diamètre du trou, une couronne (outil de forage) fixée en tête du carottier (la tête de couronne étant équipée de diamants industriels sertis ou mélangés à un liant spécial ou de dents au tungstène), d'un moteur à couple rotatif permettant l'entraînement du carottier. La puissance d'entraînement doit être adaptée à la longueur du carottier, qui, elle-même, doit être adaptée à la longueur du forage afin d'éviter de trop nombreuses interruptions, interruptions nécessaires pour récupérer les carottes,
- l'utilisation d'une glissière servant de guide au carottier, fixée comme pour la roto-percussion,
- un apport d'eau qui est nécessaire pour la remontée des produits de forage,
- un dispositif permettant de filtrer les eaux de forage pour en retenir les éléments lourds et pouvoir les évacuer, comme pour la roto-percussion,
- une source d'énergie nécessaire au fonctionnement du moteur rotatif. Elle peut être, ici aussi, soit pneumatique, soit hydraulique, soit électrique.

Dans les zones où le matériau intermédiaire (entre la tête et l'ancrage du boulon) est de très mauvaise qualité, il peut être nécessaire de tuber cette partie (ou de l'injecter pour ensuite forer au travers) afin d'éviter les éboulements et, donc, l'obstruction partielle ou totale du forage, ce qui interdirait la mise en place du boulon.

Il existe plusieurs techniques de tubage provisoire ou définitif, suivant la méthode de forage et l'outil de perforation employé.

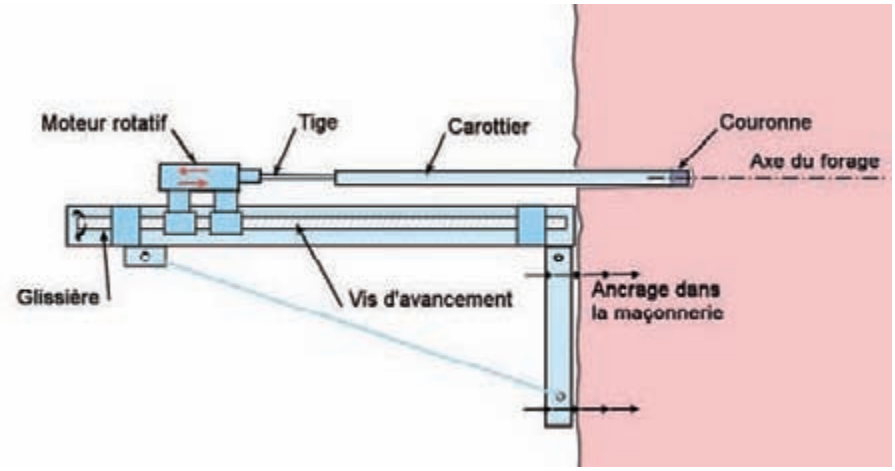



*Figure n° 47 : schéma d'un forage au carottier*

### > La préparation de la tête d'ancrage :

Dans la plus part des cas, il est nécessaire d'aménager une surface d'appui, avec **un mortier de calage** à base de liants hydrauliques, voire de synthèse (mortiers conformes aux normes **XP P18-822 et XP P 18-823**) dont la surface extérieure permet un appui correct et efficace de la plaque d'appui équipant la tête d'ancrage.

Cette assise sera de dimension légèrement supérieure à la plaque d'appuis et son épaisseur sera d'environ 20 à 30 mm, au minimum. Si l'effort appliqué au boulon est important, le calage doit être fretté.

### > La mise en place du boulon :

**Suivant le modèle choisi, la mise en place du boulon se fait dans l'ordre suivant :**

- soufflage du trou ;
- mise en place du boulon équipé de son ancrage d'extrémité (à expansion ou à sceller) :
- réalisation de l'injection de la zone d'ancrage pour assurer le scellement du boulon s'il s'agit d'un boulon de type 1 ou 2. Il faut attendre le durcissement du produit de scellement avant de mettre en tension le boulon ;

- mise place de la plaque d'appuis (une surface d'assise au mortier, aura, dans certains cas été nécessaire) ;
- centrage du boulon (le centrage est généralement facilité par l'alignement de la tige entre la partie expansive de l'ancrage et le trou central de la plaque d'appuis) ;
- mise en place du dispositif de serrage (écrou) ;
- mise en traction du boulon par vissage de l'écrou.

**> Protection du boulon :**

Si le boulon n'est pas constitué d'un matériau résistant à la corrosion, l'ensemble, tige, ancrage d'extrémité et tête d'ancrage doit être protégé vis-à-vis des risques de corrosion. Cette protection peut être assurée par un revêtement pelliculaire (peinture ou brai) ou par un traitement électrochimique de type galvanique (galvanisation à chaud).

La protection peut aussi, dans certains cas, prendre la forme d'une injection de coulis de ciment, après la pose, au travers d'un tube souple mis en place avec le boulon. Dans ce dernier cas, se posent les mêmes difficultés (mais à moindre échelle) que pour l'injection des conduits de câbles ou de tirants précontraints, à savoir la nécessité de laisser un évent pour permettre un bon remplissage, ainsi que les conséquences des effets des retraits qui fissurent le coulis.

**> Cachetage de la tête d'ancrage :**

La tête d'ancrage peut, suivant le cas, être laissée entièrement en saillies par rapport au nu extérieur de la maçonnerie, ou, au contraire, être dissimulée plus ou moins entièrement, dans une encoche faite au préalable dans la maçonnerie.

Dans ce dernier cas, l'ensemble de la tête d'ancrage peut être « cachetée » et donc, dissimulée par un remplissage au mortier ou même par une maçonnerie reconstituée.

**Il est indispensable, dans ce cas, de réaliser un repérage** le plus précis possible (à annexer au dossier de l'ouvrage et au DIUO) des positions des axes des boulons, de leur typologie exacte ainsi que de leur longueur. De plus, des repères de positionnement non corrodables sont à mettre en place sur l'ouvrage.

# 4.6.2 RÉALISATION DES TRAVAUX DE BROCHAGE OU D'ÉPINGLAGE

## 4.6.2.1 Généralités

***> Rappels : une broche (ou épingle) se compose :***

- *d'une barre d'acier (de préférence crènelée) semblable à un acier HA pour armature de béton ;*
- *d'un remplissage annulaire sous forme d'un mortier situé entre la paroi du forage et la barre d'acier.*

***Rappel : le marché** peut imposer le choix de broches en acier inoxydable ou en matériaux composites, ce qui permet d'espérer une plus longue durabilité de la réparation et/ou du renforcement.*

**> Mode de fonctionnement :**

Une broche fonctionne grâce à l'adhérence qui existe entre la broche et le produit de scellement et entre celui-ci et la maçonnerie. La broche (généralement métallique) ne joue, ici, que le rôle d'armature du cylindre de scellement. Une broche sert de harpage à l'intérieur de la maçonnerie. Son rôle est principalement de permettre la limitation des déplacements relatifs d'éléments à l'intérieur d'une maçonnerie.

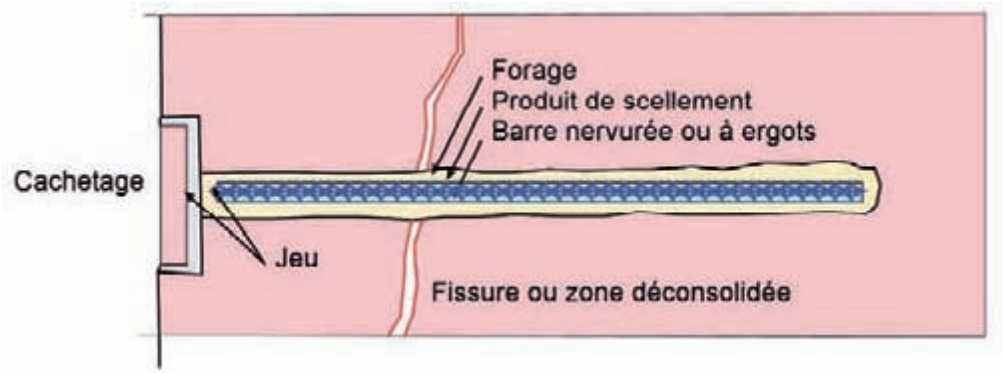



***Figure n° 48 : schéma d'une broche***

## 4.6.2.2 Préparation de l'opération

**> Lors de la préparation de l'opération sont effectués :**

- la mise en place des **cintres** ou des **étaiements** éventuellement nécessaires. Ces dispositifs doivent être conçus pour ne pas gêner le brochage et les autres travaux prévus ;
- la mise en place d'une plateforme de travail pouvant recevoir le poids de la foreuse, du personnel nécessaire à son maniement et aux contrôles, des accessoires, des matériaux, etc.,
- les travaux de dévégétalisation, de nettoyage ou de préparation de surface nécessaires ;
- le décaissement partiel ou total du matériau de remplissage en vue de son remplacement si cette opération est prévue au **marché**. Cette opération peut faciliter la mise en place des broches destinées à la stabilisation de la maçonnerie, la réalisation des injections de confortement de la maçonnerie… ;

- certains travaux, tels que l'injection des maçonneries, qu'il est préférable de consolider avant les forages. Ces forages peuvent être utilisés aussi pour des injections complémentaires ;
- l'implantation des forages, qui doivent être disposés, non sur le joint entre deux moellons, mais au milieu d'un moellon et à mi-épaisseur du bandeau ;
- l'amenée, la préparation et le réglage des matériels de forage, de scellement des broches ;
- la réalisation des **épreuves de convenance** prévues au **marché** et dans la **procédure d'exécution…**

*Il est rappelé que, lors d'un décaissement, **l'enlèvement du remblai** doit être effectué en respectant scrupuleusement la **procédure** fixée par le **bureau d'études** sous peine de risquer **la décompression de la voûte** (se reporter à **l'annexe 2 [FABEM 6.4]** sur le mode de fonctionnement des voûtes). Les arcs brisés y sont particulièrement sensibles.*

## 4.6.2.3 Préparation des produits (injection, calage…)

Se reporter à l'article 5.9.3 du guide FABEM 6.1.

## 4.6.2.4 Mise en place d'une broche

**> La mise en œuvre d'une broche nécessite les opérations suivantes :**

- le forage du trou ;
- le soufflage et nettoyage du trou ;
- la mise en place de la broche par la méthode retenue en fonction des résultats de **l'épreuve de convenance :**
  - le remplissage du trou par un mortier de scellement suivi d'une introduction en force de la broche,
  - l'introduction avec centrage de la broche dans le forage suivie par l'injection du trou ;
- l'obturation de l'orifice du forage ;
- etc.

**> Le forage du trou :**

***ATTENTION*** *au délavage que provoque l'eau de forage, mais aussi aux pressions trop importantes qui peuvent se développer dans la maçonnerie, ce qui peut entraîner des désordres, notamment au niveau des joints et du hourdage intérieur, voire des ruptures.*

Il faut prévoir un dispositif permettant de **filtrer les eaux de forage** pour en retenir les éléments lourds et pouvoir les évacuer, sans risque de pollution de l'environnement.

***ATTENTION*** *à ne pas négliger ce point lorsque le chantier a fait l'objet d'une déclaration dite* ***«loi sur l'eau»****.*

Le principe même de la broche étant sa qualité d'adhérence, il est donc nécessaire d'obtenir une qualité de contact, avec la paroi du forage, la plus «rugueuse» possible. Pour cela il faut privilégier, pour la réalisation du forage, les **techniques de roto-percussion** plutôt que des techniques de carottage qui laissent la paroi du trou beaucoup trop lisse (si la maçonnerie est trop fragile, il est possible de carotter à condition de faire un réalésage pour rendre rugueuse la paroi du forage).

Les développements sur les techniques de forage pour la mise en place de boulons d'ancrage ci-devant sont applicables pour les forages préalables à la mise en place de broches.

Lorsque l'on scelle des barres de faible diamètre et de faible longueur, il est possible d'employer un **marteau perforateur** équipé d'un foret pour un percement à sec.

Il est très intéressant, lorsque c'est possible, de forer le trou, légèrement en descente (quelques degrés d'angle suffisent par rapport à l'horizontale) afin de favoriser, par un effet gravitaire, le remplissage du trou par le mortier. Mais attention, dans ce cas, il est nécessaire de bien évacuer l'eau de lavage (soufflage à l'air) pouvant rester en fond de trou.

**> La mise en œuvre de la broche :**

Une fois le forage exécuté, la barre est mise en place et scellée. A ce niveau, il existe différentes techniques permettant, à la fois, de **positionner la barre parfaitement au centre du forage** (c'est une condition absolument nécessaire afin que l'espace annulaire entre la barre et la paroi du trou soit respecté) et de remplir cet espace annulaire avec un maximum de compacité et d'homogénéité.

Les broches peuvent devoir être réalisées dans tous les sens. En horizontal (ou légèrement inclinés vers le bas) ou inclinées vers le haut, voire même carrément verticales et au plafond (broches dans les zones de voûtes). Dans ce cas, le remplissage de l'espace annulaire doit être mis en œuvre par injection mécanique sous pression. Il sera nécessaire, pour cela, de prévoir un dispositif de coffrage (voire également un système de capotage) à la base du forage.

Une des techniques les plus répandues consiste à remplir d'abord le volume du trou avec le mortier de scellement. L'alignement du forage en légère pente de quelques degrés sur l'horizontale favorise considérablement cette opération. On procède ensuite à la mise en œuvre de la barre en la faisant pénétrer en force, à l'aide d'un outil roto-percuteur (la barre étant elle-même emmanchée dans le mandrin de cet outil) maintenu de préférence par la glissière de forage, ce qui permet de faire pénétrer la barre dans l'axe du forage (respect de l'espace annulaire). Cette méthode a pour avantage de mettre en pression (par effet de compactage) le mortier de scellement contre la paroi du forage.

L'autre technique classique est de positionner la broche dans l'axe du trou au moyen d'un dispositif de centrage puis d'injecter l'espace annulaire du trou avec un produit de scellement. Le dispositif de centrage est percé de trous pour permettre la circulation de l'injection. Cette technique permet de réaliser des broches au plafond plus facilement qu'avec la méthode précédente.

Contrairement au boulon et au tirant, le broche, par son principe de fonctionnement rappelé ci-dessus, n'a pas besoin de tête d'ancrage.

**> Cachetage de l'orifice du forage et protection de la broche :**

La barre doit être ensuite coupée à l'intérieur du trou (à quelques cm du parement) ; un ajout de mortier de scellement serré à la truelle en assurera la protection.

Pour des raisons d'aspect, le **marché** peut imposer d'obturer l'orifice du forage, en parement extérieur, par un mortier de teinte approchant de celle des pierres environnantes.

***NOTA :*** *la solution consistant à couper la barre à fleur du parement et la protéger par un revêtement passivant n'est pas une solution durable.*

La barre métallique, qui joue le rôle de broche, est semblable à une armature utilisée dans la réparation d'un ouvrage en béton armé, mais, comme elle se trouve dans un milieu «la maçonnerie» plus poreux et plus perméable que le béton, la protection apportée par le produit de scellement n'est pas forcement suffisante. La protection d'un produit à base de liants hydrauliques de pH élevé est meilleure que celle fournie par un produit à base de résines de pH~7 pour lequel une passivation de l'acier est indispensable.

**En fin de travaux** (dans le cadre du dossier de recollement et le DIUO), un repérage le plus précis possible des positions des axes des broches, de leur typologie et de leur longueur doit être effectué. De plus, des repères de positionnement non corrodables sont à mettre en place sur l'ouvrage.

# 4.6.3 RÉALISATION DES TRAVAUX D'ENSERREMENT

## 4.6.3.1 Généralités

***Rappel :*** *Lorsque l'on sort du domaine d'emploi des* ***boulons d'ancrage*** *ou des* ***broches*** *et qu'il est nécessaire de mettre en place des armatures de grande longueur sur toute la largeur d'un ouvrage en maçonnerie, par exemple pour empêcher les deux bandeaux ou les deux tympans de s'écarter il faut avoir recours aux* ***tirants d'enserrement passifs ou actifs.***

> **Mode de fonctionnement :**

- **les tirants passifs** sont, le plus souvent, des tiges métalliques filetées aux deux extrémités, munies de deux têtes d'ancrage avec plaques de répartition. Ils sont légèrement tendus pour que leurs têtes d'ancrage soient correctement plaquées sur la maçonnerie. Lorsque la maçonnerie bouge, ils se mettent en tension et commencent alors à jouer leur rôle de renfort ;

- les tirants actifs sont des armatures de précontrainte sous forme de torons, câbles ou de barres. Ils exercent leur fonction de renfort dès qu'ils sont mis en place.

## 4.6.3.2 Préparation de l'opération

**> Lors de la préparation de l'opération sont effectués :**

- la mise en place des **cintres** éventuellement nécessaires (ces cintres doivent être conçus pour ne pas gêner certains travaux comme ceux de création de trous pour le recentrage de l'outil taillant en vue de réduire les déviations lors du forage, la réalisation d'injections, l'obturation de fuites de coulis, le rejointoiement…) ;

- la mise en place d'une plateforme de travail pouvant recevoir le poids de la foreuse, du personnel nécessaire à son maniement et aux contrôles, des accessoires, des matériaux, etc.,

- les travaux de dévégétalisation, de nettoyage ou de préparation de surface nécessaires ;

- le décaissement partiel ou total du matériau de remplissage en vue de son remplacement, si cette opération est prévue au **marché**. Cette opération peut faciliter la réalisation des tirants d'enserrement destinés à la stabilisation des murs tympans, la réalisation des injections de confortement de la maçonnerie… ;

- certains travaux, tels que l'injection des maçonneries, qu'il est préférable de consolider avant les forages. Ces forages peuvent être utilisés aussi pour des injections complémentaires ;

- l'implantation des forages qui doivent être disposés, non sur le joint entre deux moellons, mais au milieu d'un moellon et à mi-épaisseur du bandeau ;

- l'amenée, la préparation et le réglage des matériels de forage, de mise en tension et d'injection ;

- la réalisation des **épreuves de convenance** prévues au marché et dans la **procédure d'exécution…**

*Il est rappelé que lors d'un décaissement, **l'enlèvement du remblai** doit être effectué en respectant scrupuleusement la **procédure** fixée par le **bureau d'études** sous peine de risquer la **décompression de la voûte** (se reporter à l'**annexe 2 [FABEM 6.4]** sur le mode de fonctionnement des voûtes). Les arcs brisés y sont particulièrement sensibles.*

## 4.6.3.3 Préparation des produits (injection, calage…)

Se reporter à **l'article 5.9.3 du guide FABEM 6.1.**

## 4.6.3.4 Mise en place d'un tirant d'enserrement dans un corps de voûte

**> La mise en œuvre d'un tirant nécessite les opérations suivantes :**

- le forage du trou ;
- le soufflage et nettoyage du trou ;
- la mise en place du tirant et, si nécessaire, d'un tubage de protection ;
- la mise en place des deux têtes d'ancrage ;
- le serrage (mise en traction) manuel ou mécanique du tirant ;
- l'injection pour en assurer la protection ;
- le cachetage (ou camouflage) éventuel de la tête d'ancrage ;
- etc.

**> Le forage du trou :**

***NOTE :*** *cette partie est quasiment commune aux trois techniques (boulons, broches et tirants).*

***ATTENTION*** *au délavage que provoque l'eau de forage, mais aussi aux pressions trop importantes qui peuvent se développer dans la maçonnerie ce qui peut entraîner des désordres, notamment au niveau des joints et du hourdage intérieur, voire des ruptures.*

Il faut prévoir un dispositif permettant de filtrer les eaux de forage pour en retenir les éléments lourds et pouvoir les évacuer, sans risque de pollution de l'environnement.

***ATTENTION*** *à ne pas négliger ce point lorsque le chantier a fait l'objet d'une déclaration dite* ***«loi sur l'eau»****.*

**La méthode de forage du trou** (roto-percussion ou carottage) est choisie en fonction de la nature et la qualité du matériau à perforer (se reporter aux paragraphes relatifs au choix des matériels et à la réalisation des forages des boulons d'ancrage ci-devant).

Dans le cas où il n'y a pas de problèmes pour l'écoulement des eaux et que l'esthétique de l'ouvrage n'est pas préoccupant, il est possible de supprimer les forages dans le corps de voûte en plaçant **deux lits de tirants :** l'un passant sous l'intrados et l'autre au dessus de l'extrados de la voûte dans le remplissage (se reporter à la figure ci-dessous).

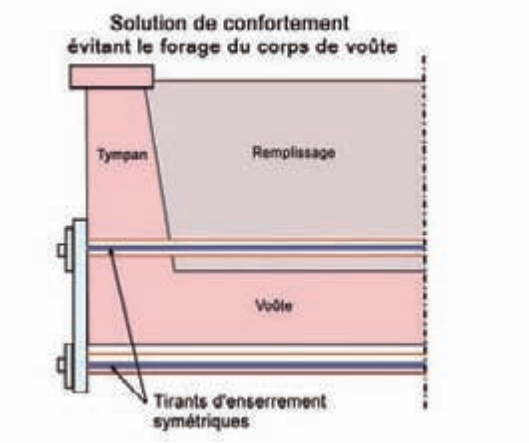



*Figure n° 49 : solution à deux lits de tirants*

**Dans le cas où le corps de voûte ne nécessite pas une injection,** il est cependant nécessaire de reboucher ou d'injecter les **fissures longitudinales de la voûte,** en particulier celles à la jonction du corps de voûte et du bandeau, avant la mise en place des tirants d'enserrement. Cette injection est réalisée en partant du point bas et en remontant vers la clé de voûte. Se reporter à la 3ème partie du présent guide qui détaille la réalisation d'une injection de maçonneries.

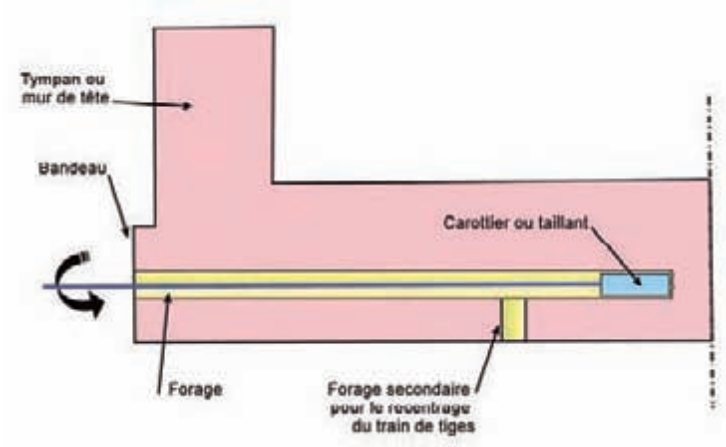



*Figure n° 50 : principe à appliquer pour centrer le forage*

Les forages étant exécutés à l'horizontale, l'outil taillant a tendance, sous l'effet de la pesanteur, à dévier vers le bas. Il faut percer des **trous verticaux** à l'intrados espacés de 1,50 à 2 mètres le long des axes des forages horizontaux, de manière à repositionner à l'aide de cales le train de tiges de l'outil taillant.

Ces trous servent aussi à constater l'état de la maçonnerie, la régularité du trou foré, à évacuer les eaux de forage et de nettoyage, ainsi qu'aux opérations d'injection complémentaires éventuelles.

Un fois le forage terminé, il faut nettoyer les parois du trou à l'eau sous faible pression, de l'ordre de 0,10 à 0,20 MPa, puis souffler à l'air déshuilé pour chasser l'excès d'eau.

***NOTA :*** *pour éviter un excentrement des efforts du même côté, il est conseillé de fixer les points d'entrée alternativement du côté amont et du côté aval de la voûte.*

Ensuite, un examen de l'état de la maçonnerie est effectué en présence du **maître d'œuvre,** en utilisant les techniques prévues au **marché** et dans la **procédure d'exécution** (endoscopes, caméra…). **L'entrepreneur**, en fonction des résultats de cet examen, peut proposer au **maître d'œuvre** de procéder à une injection complémentaire de la maçonnerie. Dans le cas où la proposition d'injection est validée, il faut laisser quelques joints dégarnis qui permettront de contrôler sa réalisation.

**Dans le cas où il faut injecter la maçonnerie du corps de voûte,** les conduits réalisés par les forages sont utilisés. Le coulis est injecté sous une pression de l'ordre de 0,25 MPa par une extrémité jusqu'à l'autre extrémité, qui est équipée d'un évent. Cet évent sert ensuite à faire une reprise d'injection. L'injection est arrêtée dès que le coulis commence à passer par les joints laissés dégarnis. Pour bien répartir le coulis d'injection, il faut commencer par injecter les forages situés près des reins, en remontant et en alternant à gauche puis à droite de la voûte et même de l'amont vers l'aval et inversement.

Cette façon de procéder oblige **à forer de nouveau les trous destinés au passage des tirants d'enserrement** après durcissement du coulis. Dans un tel cas, il peut être possible, après examen des parois du forage, de supprimer le conduit métallique ou plastique si le tirant passif ou actif peut être considéré comme non corrodable, voire s'il est remplaçable (non scellé par un coulis à base de liants hydrauliques).

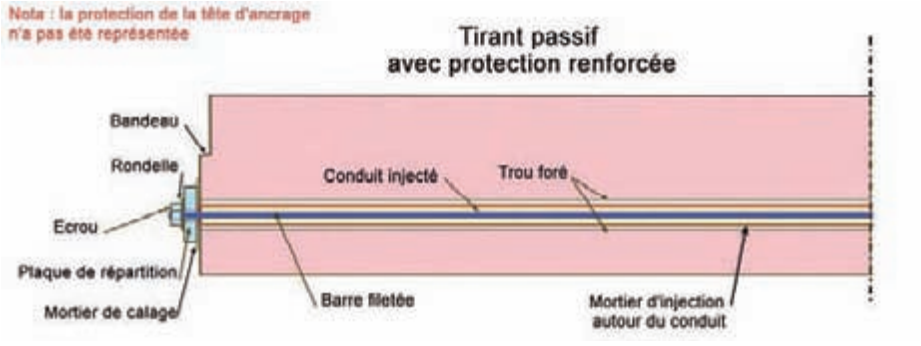



***Figure n° 51 : tirant d'enserrement avec protection renforcée***

Il est aussi envisageable de mettre en place le conduit métallique ou plastique lors du forage et de réaliser l'injection du vide annulaire entre la paroi du trou et le conduit. Cette façon de procéder évite d'avoir à refaire le forage du conduit du tirant d'enserrement. Cette technique présente l'inconvénient de ne pas permettre l'inspection du conduit foré et de la maçonnerie environnante.

Avant de mettre en place les tirants, si, pour des raisons esthétiques imposées par le **marché**, les plaques d'ancrages doivent être dissimulées, il faut procéder au creusement des niches ou engravures nécessaires à cette implantation. Ces ancrages pouvent intéresser, soit une seule pierre du bandeau de voûte, soit deux ou trois pierres successives.

**C'est le projet** qui définit le nombre des tirants actifs ou passifs à disposer, l'importance des efforts de serrage à appliquer sur les bandeaux et la voûte et les efforts qui s'exercent sous les ancrages, voire sous les plaques de répartition, ainsi que la géométrie de ces ancrages et de ces plaques.

***Figure n° 52 : disposition des plaques de répartition (attention à leur protection)***

***Photo n° 60 : plaque de répartition*** *(crédit photo Cofex Littoral)*

**> Cas des tirants actifs :**

Les plaques de répartition qui doivent équilibrer les efforts lors de la mise en tension peuvent être métalliques, mais traitées contre la corrosion ou inaltérables, en béton armé ou, mieux pour la durabilité, en **BFUP**.

La surface de la maçonnerie sous les plaques d'ancrage doit être repiquée de façon que l'épaisseur du mortier de calage soit quasiment la même sur toute la surface d'appui.

Les ancrages et les éventuelles plaques de répartitions sont mis en place, réglés, puis fixés provisoirement par des cales ou par des vis chevillées dans la maçonnerie. Entre le parement de la maçonnerie et les ancrages et/ou les plaques doit être mis en place un mortier de calage à base de liants hydrauliques, voire de synthèse (mortiers conformes aux normes **XP P 18-822 et XP P 18-823**), dont la surface extérieure permet un appui correct et efficace de la plaque de répartition de la tête d'ancrage.

Cette assise sera de dimension légèrement supérieure à la plaque d'appuis et son épaisseur sera d'environ 20 à 30 mm au minimum ; si l'effort appliqué lors de la mise en tension du tirant est important, le calage doit être fretté.

La mise en tension des armatures de précontrainte doit être effectuée au moyen de vérins en respectant les dispositions de la **procédure de mise en tension,** laquelle doit respecter les dispositions de **l'agrément technique européen,** celles du **fascicule 65 du CCTG** et les exigences particulières du **marché.**

***ATTENTION :*** *il faut alterner les mises en tension des différents tirants situés aux reins, à mi-montée et à la clé et procéder par paliers, avec reprises de tension afin de répartir les contraintes de serrage le plus uniformément possible sur la maçonnerie.*

La contrainte à exercer sur le corps de voûte est fixée par le bureau d'études ; elle est, en général, relativement faible (0,1 à 0,2 MPa). La pression sous les plaques d'ancrage est plus importante (entre 1 et 3 MPa).

***ATTENTION :*** *les déformations différées de maçonnerie étant incertaines, il faut prévoir de contrôler par une remise en tension et ce, pendant plusieurs jours, la force de serrage des tirants jusqu'à stabilisation des mesures (se reporter aux contrôles applicables aux armatures de faible longueur développées dans le* ***fascicule 65 du CCTG).***

- **Cas des barres :** chaque barre est glissée dans le conduit ; il y a lieu de prévoir des **bagues de centrage** percées pour permettre ensuite la réalisation des injections de protection. La barre constituant le tirant est mise en tension avec l'aide de vérins.

- **Cas des monotorons gainés protégés :** les torons constituant un câble sont mis en place dans le conduit, puis mis légèrement en tension pour y être sensiblement centrés. Ensuite, le conduit est injecté par un coulis à base de ciment et, après durcissement de ce dernier, les torons sont mis en tension à l'aide de vérins. Cette technique permet de multiplier les barrières de protection (gaine extérieure, coulis, gaine monotoron, graisse ou cire pétrolière).
- **Cas des câbles :** chaque câble est mis en place dans le conduit puis est mis en tension avec l'aide de vérins. Ensuite, les câbles sont protégés par une injection souple ou rigide suivant les dispositions du **marché**.

**> Cas des tirants passifs :**

Les ancrages et les plaques de répartitions sont mis en place, réglés, puis fixées provisoirement par des cales ou des vis chevillées. Entre le parement de la maçonnerie et les ancrages et/ou les plaques doit être mis en place un mortier de calage, comme pour les tirants actifs.

Les tirants d'enserrement sont glissés dans le conduit. Il y a lieu de prévoir des **bagues de centrage** percées pour permettre ensuite la réalisation des injections de protection. Les barres constituant les tirants sont mises en légère tension (quelques MPa) à la clef dynamométrique, puis le blocage des écrous est obtenu par le serrage d'un contre-écrou.

Comme pour les tirants actifs, il faut alterner les mises en tension de façon à uniformiser le plus possible la compression de la maçonnerie.

## 4.6.3.5 Mise en place d'un tirant d'enserrement au travers des tympans, des murs en retour et du remplissage

Dans le cas où le matériau de remplissage est de bonne qualité (voir le nota) et n'a pas être remplacé, il faut réaliser des **forages à sec** avec mise en place d'un tubage dans lequel sont ensuite introduits les tirants. Cette façon de procéder éviter le délavage et la désagrégation du remblai.

***NOTA :*** *certains remplissages, en particulier ceux des ponts ferroviaires, sont constitués de pierres plates rangées soigneusement qui forment un remplissage drainant d'excellente qualité, mais où la réalisation des forages risque d'être délicate.*

***Photo n° 61 : forage des tympans pour le passage des tirants d'enserrement*** *(crédit photo DDE 52)*

***NOTA :*** *lorsque les forages ont lieu dans un mur dont l'épaisseur ne risque pas d'entraîner une déviation significative du forage, il n'est pas nécessaire d'imposer d'alterner les points d'entrée alternativement du côté amont et du côté aval du mur. Le risque de déviation peut cependant se poser pour des forages dans un contrefort.*

Dans le cas où l'on procède à un décaissement, les forages sont exécutés au travers des murs, puis on procède au remblaiement (béton maigre ou remblai graveleux bien drainant jusqu'au niveau du premier lit de tirants). Les tirants sous gaine sont mis en place, puis on recommence le remblaiement jusqu'au niveau du second lit de tirants... Les opérations de mise en place d'un remblai et son compactage doivent être exécutées avec beaucoup de précautions pour ne pas endommager les tirants et leur conduit de protection.

**La mise en tension des tirants** est réalisée normalement au fur et à mesure des phases de remblaiement en suivant les exigences du bureau d'études reprises dans la **procédure d'exécution.**

***Photo n° 62 : mise en place de tirants d'enserrement actifs*** *(crédit photo DDE 52)*

***REMARQUE :*** *la protection des tirants d'enserrement actifs de la photographie ci-dessus n'est pas satisfaisante.*

## 4.6.3.6 Protection des tirants d'enserrement et des têtes d'ancrage

S'il est important de bien protéger les tirants dans leur partie courante, il est également indispensable de protéger les extrémités des tirants pour éviter toute arrivée d'eau sur les tirants, les têtes d'ancrage, les écrous de serrage… Par exemple, est à craindre la percolation d'eau au travers du mortier de calage.

**Il est indispensable que le projet comporte des plans à une échelle convenable montrant que l'étanchéité des tirants est bien assurée sur toute leur longueur.**

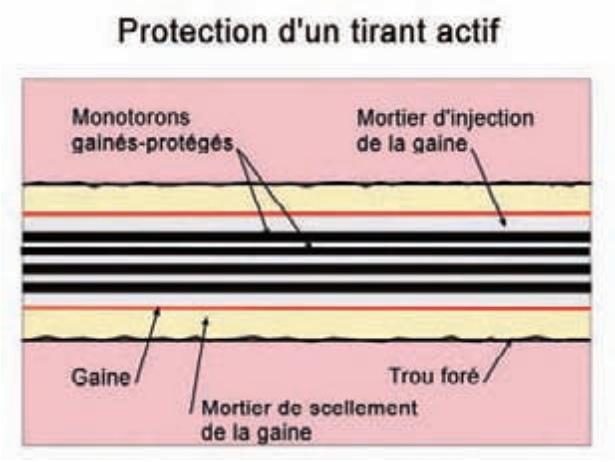



***Figure n° 53 : protection d'un tirant actif***

**Cas des tirants actifs :** en fonction des exigences du **marché**, les tirants actifs sont protégés par une injection au coulis de ciment ou une injection de cire pétrolière, en respectant les dispositions de la **procédure d'injection,** celles de **l'ATE** et celles du **fascicule 65 du CCTG.** Les ancrages doivent être protégés par des capots traités contre la corrosion.

**Cas des tirants passifs :** les exigences ci-dessus applicables aux tirants actifs sont utilisables pour les tirants passifs. Les plaques de répartition extérieures, comme les croix de Saint-André, ne sont pas recouvertes par un capot de protection, mais les extrémités des tirants ainsi que les écrous et contre-écrous doivent l'être.

**> Dans le cas où le marché impose le rebouchage des niches, celui-ci doit avoir lieu après le nettoyage des parements et une reconnaissance des caractéristiques des pierres :**

- type de pierre fonction de sa dureté et de sa porosité conformément à l'ancienne norme **NF B 10-301** (très tendre, tendre, semi-ferme, ferme, dure ou froide) ;
- granulométrie (grain très fin peu ou pas visible à l'œil nu, grain fin ≤ 0,5 mm, grain moyen entre 0,5 et 1,5 mm ou grain gros > 1,5 mm),
- couleurs sur la cassure fraîche d'un morceau de pierre de l'ouvrage.

Les niches sont rebouchées, soit par une plaque de pierre posée à bain de mortier, soit par un micro-béton pouvant être armé par des aciers en acier inoxydables scellés dans la maçonnerie.

***ATTENTION,*** *un jeu assurant la dilatation doit être ménagé entre les parties métalliques et le dispositif de fermeture de la niche.*

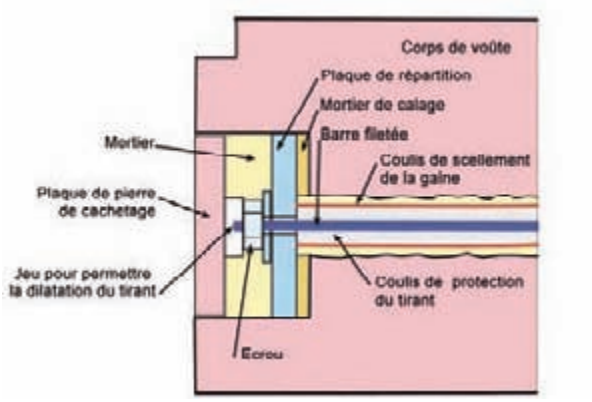



***Figure n° 54 : exemple de cachetage d'une tête d'ancrage***

Pour des raisons d'aspect, il est souhaitable que ce mortier se fonde dans la maçonnerie existante. La teinte du mortier peut être obtenue en récupérant les produits de forage si la qualité de la pierre le permet (se reporter à la norme **NF EN 12620 :** granulats pour béton) ou, plus simplement, en utilisant des mortiers de restauration des pierres de taille prêts à l'emploi pour lesquels des nuanciers permettent de choisir la bonne teinte. Suivant le grain de la pierre d'origine, pour les mortiers, il faut utiliser, dès le début de leur durcissement, un outil de finition de surface adapté (sciotte [petite scie à main], rabotin ou chemin de fer, boucharde, riflard ou ripe [ciseau à lame triangulaire lisse ou dentelée]…).

Il est indispensable, dans le cas où les têtes d'ancrage doivent être dissimulées, de réaliser un repérage le plus précis possible, à annexer au **dossier de l'ouvrage et au DIUO,** des positions des axes des tirants, de leur typologie exacte. De plus, des repères de positionnement non corrodables sont à mettre en place sur l'ouvrage, si c'est prévu au **marché**.

***Photo n° 63 : pont dit de 100 mètres, niches de logement des ancrages*** *(crédit photo DDE 52)*

***Photo n° 64 : pont dit de 100 mètres, plaque de répartition dans sa niche*** *(crédit photo DDE 52)*

Dans le cas où le nettoyage des parements n'est pas imposé par le **marché**, il est possible, pour améliorer l'aspect de l'ouvrage, de patiner les parties restaurées avec des produits naturels comme des terres (ocre jaune ou terre de sienne…), mais il ne faut pas utiliser de peinture, qui empêche la formation du calcin et bloque les échanges hydriques avec l'extérieur.

***Photo n° 65 : pont dit de 100 mètres aspect des parties restaurées, le ravalement des maçonneries n'ayant pas été prévu au marché*** *(crédit photo DDE 52)*

## 4.6.3.7 Autres travaux connexes

Si la mise en place de boulons d'ancrages, ou de broches ou de tirants d'enserrement, est suivie d'autres opérations, comme la réalisation d'une chape d'étanchéité, le remblaiement de la ou des voûtes… se reporter aux articles et paragraphes des guides «Maçonnerie» qui traitent de ces différentes opérations.

## 4.7.1 AVERTISSEMENT

Les dispositions générales relatives à l'organisation des essais et contrôles et les obligations des parties figurent dans **le paragraphe 5.10 du guide FABEM 6.1** auquel le lecteur est invité se reporter. Ces dispositions générales traitent des notions de **contrôles interne, externe et extérieur,** de l'organisation des épreuves **d'étude, de convenance et d'information,** de l'organisation des **contrôles d'exécutions et de la réception des travaux.**

**Les essais et contrôles spécifiques** à effectuer lors de travaux de boulonnage, brochage ou d'enserrement à quelques détails près, portent sur les mêmes points, tels que l'implantation des forages, le forage des trous, la mise en place des renforts… Ces essais et contrôles sont donc regroupés dans le même paragraphe assortis des compléments nécessaires aux trois techniques.

## 4.7.2 ESSAIS ET CONTRÔLES RELATIFS AUX BOULONS D'ANCRAGE, BROCHES ET TIRANTS D'ENSERREMENT

### 4.7.2.1 Généralités

**> Les essais et contrôles à effectuer par l'entrepreneur lors de la réalisation d'un boulonnage, d'un brochage ou d'un enserrement peuvent être rattachés aux cinq catégories suivantes :**

a. **l'épreuve d'étude (pour mémoire) : cet article peut concerner certains produits non normalisés** (se reporter aux dispositions générales sur l'organisation des essais et contrôles) ;

b. **les contrôles de réception des produits et matériaux ;**

c. **l'épreuve de convenance ;**

d. **les contrôles d'exécution pendant l'opération ;**

e. **les contrôles d'exécution après l'opération** (article regroupé avec le précédent sur les contrôles pendant l'opération).

### 4.7.2.2 Contrôles de réception des produits et matériaux

Se reporter au **paragraphe 5.10.3 du guide FABEM 6.1** qui fixe les exigences lors de la réception, qui sont communes à toutes les techniques de réparation ou de renforcement.

**> Les contrôles de réception, en fonction du type d'opération à réaliser, peuvent porter sur les matériaux, produits et dispositifs suivants :**

- armatures sous forme de barres de type béton armé ou non[16] (en acier ordinaire, en acier ordinaire galvanisé et en acier inoxydable) ;
- unités et armatures de précontraintes (câbles, torons et barres) ;
- armatures composites passives ou actives ;
- conduits et gaines ;
- profilés métalliques (barres, cornières, UAP, UPN…) pour la réalisation des tirants passifs, des plaques de répartition et des dispositifs d'ancrage ;
- aciers moulés pour la confection des dispositifs d'ancrage et des plaques de répartition ;
- produits et systèmes de produits de protection contre la corrosion et les autres agressions ;
- produits et systèmes de produits de scellement et de calage ;
- procédés d'entreprise ;
- etc.

**Le paragraphe 4.4** ci-dessus, relatif aux caractéristiques des boulons, broches, tirants et matériaux connexes donne les textes de références (fascicules du CCTG, normes, marques de qualité…) auxquels il faut se référer lors de la réception. **Le marché,** en se basant sur ces textes, fixe les exigences à respecter (procédure, nombre et types d'essais à effectuer).

## 4.7.2.3 Épreuve de convenance

**> L'épreuve de convenance porte sur les quatre phases suivantes :**

1. **la préparation de l'opération ;**
2. **la préparation des produits ;**
3. **la réalisation de l'opération ;**
4. **l'après-réalisation de l'opération.**

**Le marché** fixe le nombre et la position (par exemple, aux reins, à la demi-montée et à la clé de voûte) des boulons, des broches ou des tirants d'enserrements à exécuter lors de **l'épreuve de convenance.**

[16] *Ces barres appartiennent à la catégorie des profilés métalliques.*

**> Les essais à effectuer lors de cette épreuve de convenance sont les mêmes que ceux à effectuer lors des contrôles d'exécution développés dans l'article 4.7.2.4 ci-dessous, en tenant compte des exigences complémentaires suivantes :**

- les résultats obtenus par l'ensemble des contrôles réalisés doivent conduire, si nécessaire, à rectifier et compléter la **procédure d'exécution ;**
- les contrôles lors de la réalisation des forages doivent **valider le choix du matériel de forage** (respect de l'intégrité de la maçonnerie, déviation maîtrisée…) ; ils doivent aussi permettre de savoir si des **injections complémentaires** de la maçonnerie sont ou non nécessaires ;
- le procédé de nettoyage après forage élimine les détritus et, si besoin est, assèche les parois et le fond du trou ;
- plusieurs mises en charge des boulons d'ancrage et des tirants d'enserrement actifs, afin de contrôler leur tension, doivent être effectuées sur une période de temps suffisante (de l'ordre d'une semaine pour les tirants actifs) afin de pouvoir estimer le nombre des reprises de tension à effectuer ;
- plusieurs serrages des écrous des tirants d'enserrement passifs, afin de contrôler leur serrage, doivent être effectuées sur une période de temps suffisante afin de pouvoir estimer le nombre des reprises de serrage à effectuer ;
- la partie de **l'épreuve de convenance** relative à la mise en œuvre des produits de protection peut être effectuée après la mise en place et en tension de l'ensemble des tirants actifs si le délai entre la mise en tension et la protection reste dans les limites fixées par le **fascicule 65 du CCTG** et/ou **le marché** ;
- un essai de traction, demandé par le **marché** pour les **boulons**, est réalisé à l'aide d'un vérin hydraulique dont le mandrin s'adapte à l'extrémité du boulon et dont la réaction se reporte sur la plaque d'appuis. L'effort exercé par le vérin est fixé, suivant le cas, à «x» fois la traction nominale indiquée par la fiche technique du boulon ;
- un essai de traction demandé par le **marché** pour les **broches** est réalisé à l'aide d'un vérin hydraulique dont le mandrin s'adapte sur l'extrémité de la broche qui ne doit pas être coupée comme les broches courantes. La réaction se reporte sur la maçonnerie par l'intermédiaire d'un chevalet métallique (se reporter aux essais d'ancrage décrit dans le paragraphe 3.4.1 ci-dessus). L'effort exercé par le vérin est fixé, suivant le cas, à «x» fois la traction nominale retenue lors du dimensionnement.

## 4.7.2.4 Contrôles d'exécution

**Ces différents contrôles** sont les mêmes que ceux effectués lors des **différentes épreuves de convenance** visées dans le paragraphe ci-devant.

***NOTA :*** *la mise en place de tirants d'enserrement ne nécessite pas de* ***préparation particulière du support*** *(pierres et joints). Si des exigences sont à fixer, il y a lieu de se reporter au paragraphe qui traite de ce sujet.*

**> 1. Les contrôles d'exécution relatifs à la préparation de l'opération figurent dans le paragraphe 5.10 du guide FABEM 6.1 auquel le lecteur est invité se reporter. Le marché adapte ces dispositions générales aux spécificités des travaux, par exemple en traitant de :**

- l'approvisionnement, la mise en place et la vérification du bon état, du bon fonctionnement et de l'étalonnage (si besoin est) du matériel nécessaire à l'opération (matériel de forage, clefs dynamométriques, clefs à choc, vérins de mise en tension…) ;
- l'approvisionnement des matériaux et produits (produits de calage et d'injection…) ;
- etc.

**> 2. Les contrôles d'exécution relatifs à la préparation des produits concernent :**

- **Les contrôles relatifs à la préparation des produits de calage et de scellement.**

Les produits de calage sont, soit à base de résines, soit à base de liants hydrauliques. Les contrôles de préparation de ces produits sont détaillés dans le **paragraphe 5.10.5.3 du guide FABEM 6.1.**

- **Les contrôles relatifs à la préparation des produits d'injection et de protection :**

Se reporter au **fascicule 65 du CCTG** et au **guide FABEM 8** lorsqu'il s'agit de produits utilisés pour la protection des tirants actifs ou passifs (coulis de ciment, cires pétrolières…).

Se reporter à la 3ème partie du présent guide, si l'injection concerne la maçonnerie.

**> 3. Les contrôles pendant la réalisation de l'opération :**

- **Contrôles d'implantation des forages :**

**Ces contrôles** doivent permettre de s'assurer que tous les emplacements de forage fixés sur les plans d'exécution ont bien été implantés avec leur numérotation aux emplacements prévus, avec les points d'entrée et ceux théoriques de sortie. La consistance de ce contrôle est proposée par **l'entrepreneur** à l'acceptation du **maître d'œuvre** dans le cadre de la **procédure d'exécution** et dans le respect des exigences du **marché.**

***NOTA :*** *pour éviter un excentrement des efforts du même côté, il est conseillé de fixer les points d'entrée alternativement du côté amont et du côté aval de la voûte. Lorsque les forages ont lieu dans des murs dont l'épaisseur ne risque pas d'entraîner une déviation significative du forage, cette précaution n'est pas nécessaire.*

■ **Contrôles de la réalisation des forages :**

• **Ces contrôles doivent permettre de s'assurer :**

- si les forages sont traversants (cas des tirants d'enserrement), que la sortie de l'outil ne provoque pas de dégradation significative des pierres,
- que chaque forage est réalisé en respectant, au niveau du point de sortie de l'outil, les tolérances d'implantation fixées au **marché,**
- que le trou a été correctement nettoyé, voire asséché si un produit de scellement à base de résine doit être mis en œuvre
- que de l'état de la maçonnerie ne nécessite pas des injections complémentaires. Cet examen est effectué en présence du **maître d'œuvre** en utilisant les techniques prévues **au marché** et dans la **procédure d'exécution** (endoscopes, caméra…) (1).

La décision du **maître d'œuvre** concernant les **injections complémentaires** constitue **un POINT D'ARRÊT.**

***REMARQUE (1) :*** *les examens de la maçonnerie pratiqués lors de* ***l'épreuve de convenance*** *et au cours des premiers forages, sous réserve de les effectuer en divers endroits de la voûte (reins, milieu de la montée et clé de voûte), permettent d'avoir une bonne connaissance de l'état de la maçonnerie et donc d'alléger le nombre des examens à effectuer et aussi de savoir assez rapidement si des injections complémentaires sont nécessaires.*

■ **Contrôles de mise en œuvre des produits de calage et de scellement :**

***Rappels :***

*Trois techniques de mise en place* ***d'un produit ou d'un système de produits de calage*** *sont possibles : coulage d'un coulis fluide ou injection d'un coulis fluide ou matage d'un mortier sec.*

***Un produit ou d'un système de produits de scellement*** *est mis en place, soit gravitairement dans le trou après forage, soit injecté.*

*Les contrôles à effectuer pendant l'opération et après l'opération sont détaillés dans le paragraphe 5.10.5.3 du guide FABEM 6.1 et, pour plus de détails, dans le* ***guide FABEM 1.***

■ Contrôles de mise en place et en tension des boulons d'ancrage :

**Les contrôles portent** sur les différentes phases de cette opération décrite ci-devant.

Dans le cas des boulons ancrés par scellement, la levée du **POINT D'ARRÊT** pour la mise en tension est liée aux résultats des essais de résistance du produit de scellement.

Lors de la mise en tension des boulons, le **contrôle** porte sur le relevé des mesures effectuées sur chaque boulon (courbes efforts-déformations) et l'absence de glissement du boulon.

■ **Contrôle de mise en place des broches :**

**Les contrôles portent** sur les différentes phases de cette opération décrite ci-devant.

**Le contrôle** doit s'assurer, sur des prélèvements du produit de scellement, que celui-ci, après durcissement, a atteint les performances requises pour que les broches correspondantes puissent être acceptées.

■ **Contrôles de mise en place et en tension des tirants d'enserrement :**

Les contrôles portent sur les différentes phases de cette opération décrite ci-devant.

■ **Contrôles de mise en place et en tension des tirants d'enserrement actifs (armatures de précontrainte) :**

**Les contrôles à effectuer** (courbe pression allongement…) sont ceux visés par **l'agrément technique européen, le fascicule 65 du CCTG** et les exigences particulières du **marché**, en tenant compte des informations obtenues lors de **l'épreuve de convenance** sur le nombre des reprises de tension afin d'obtenir une stabilisation de l'effort.

En cas de doute sur la tension d'un tirant **dont la gaine n'a pas été encore injectée,** il est possible de mesurer sa tension avec la **méthode vibratoire.**

**Cette méthode** repose sur l'application de la théorie des **cordes vibrantes,** qui relie la fréquence du mode fondamental de vibration d'un fil tendu à sa tension, en fonction de sa longueur et de sa masse linéique. Connaissant ces deux derniers paramètres, il est aisé de mettre le fil en vibration, de mesurer la fréquence du mode fondamental et ses harmoniques et d'en déduire la **tension** du fil.

La validité d'une telle application à un **câble** repose sur l'hypothèse que la rigidité en flexion du câble et négligeable ou sans influence sur la vitesse de propagation d'un ébranlement transversal, quelle que soit sa fréquence.

***ATTENTION,*** *la mesure de la tension de* ***barres*** *nécessite un tarage préalable par un autre procédé (cf. l'article 104 du* ***fascicule 65 du CCTG****), à cause de l'effet parasite dû à l'encastrement partiel des barres au niveau des ancrages.*

***Avec un appareillage adapté :*** *un accéléromètre et son électronique associée, ainsi qu'un analyseur de fréquence (mesure des fréquences des modes successifs de vibration du câble) permettant de mesurer les fréquences avec une précision de 0,5% (les valeurs relatives de la longueur et de la masse linéique d'un câble peuvent être connues à 1% près), la tension peut être obtenue en valeur absolue avec une précision de l'ordre de 4%. Dans le cas d'un suivi périodique, la longueur et la masse linéique n'intervenant pas, des variations de tension de l'ordre de 1% peuvent être mises en évidence.*

**Il existe également une méthode faisant l'objet d'un brevet® pour déterminer les efforts dans les tirants, les clous les boulons des soutènements,** qui peut aussi être utilisée pour les tirants et boulons les ouvrages en maçonnerie.

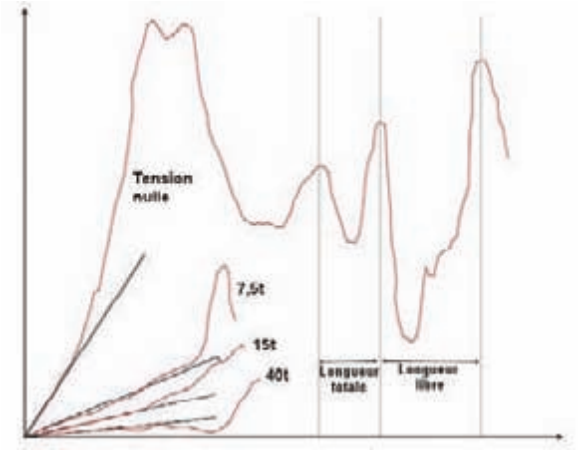



***Figure n°55 : courbes d'enregistrement des mesures de tensions***

Le principe de l'essai consiste à mettre en vibration l'élément à tester dans le sens longitudinal. La force de l'impact est mesurée au moyen d'un capteur de force piézoélectrique. La vitesse est déduite de l'accélération mesurée au moyen d'un accéléromètre. L'acquisition faite dans le domaine temporel est, au moyen des transformées de Fourier, exploitées dans le domaine fréquentiel. Les courbes obtenues sont du type vitesse sur fréquence (V/F), fonction de la fréquence vibratoire.

La raideur dynamique est un nombre complexe proportionnel à l'inverse de la pente à l'origine dans le repère défini précédemment et dont une représentation suit.

Il existe une relation entre la raideur dynamique et la tension dans les éléments de renforcement. De la raideur dynamique globale mesurée il est nécessaire de retrancher les raideurs dynamiques complémentaires générées par les inerties liées, par exemple, à la présence d'une paroi en béton projeté.

***Photo n° 66 : contrôle à l'aide de l'analyse de la réponse vibratoire des tirants d'une paroi*** *(crédit photo A. Bouineau)*

***Photo n° 67 : acquisition des mesures*** *(crédit photo A. Bouineau)*

***Photo n° 68 : acquisition des mesures*** *(crédit photo A. Bouineau)*

***Photo n° 69 : contrôle d'un tirant ancien*** *(crédit photo A. Bouineau)*

■ **Contrôles de mise en place et en tension des tirants d'enserrement passifs :**

**Les contrôles à effectuer** portent sur le couple de serrage des écrous et la mise en place des contre-écrous. **L'épreuve de convenance** peut imposer une reprise des serrages décalée dans le temps.

■ **Contrôles de mise en œuvre des produits de protection des boulons d'ancrage et des tirants d'enserrement :**

Les contrôles à effectuer lors des diverses opérations d'injection (scellement des gaines, protection des barres, câbles…) peuvent être repris de ceux visés, pour les injections de conduits de précontrainte, par **l'agrément technique européen,** le **fascicule 65 du CCTG** et les exigences particulières du **marché** en tenant compte des informations obtenues lors de **l'épreuve de convenance** concernant cette opération.

■ **Contrôles de la protection des têtes d'ancrage apparentes ou non des boulons d'ancrage et des tirants d'enserrement et de la protection des extrémités des broches**

**Les contrôles** portent sur les différentes phases de ces opérations décrites ci-devant de façon à s'assurer que la protection est correctement assurée.

Si les têtes des ancrages des boulons d'ancrage et des tirants d'enserrement sont cachetées, leur position doit faire l'objet d'un relevé. Il est rappelé que des repères de positionnement non corrodables sont à mettre en place sur l'ouvrage si le **marché** le prévoit.

Les extrémités des broches étant cachetées, leur position doit faire l'objet d'un relevé. Il est rappelé que des repères de positionnement non corrodables sont à mettre en place sur l'ouvrage si le **marché** le prévoit.

### Contrôles d'opérations connexes

Des contrôles particuliers sont à prévoir si la mise en place de boulons d'ancrages, ou de broches ou de tirants d'enserrement est suivie d'autres opérations comme la réalisation d'une chape d'étanchéité, le remblaiement de la ou des voûtes… (se reporter aux paragraphes des guides «Maçonnerie» qui traitent de ces opérations).

### Les contrôles après la réalisation de l'opération :

Les contrôles portent sur l'aspect de l'ouvrage renforcés par rapport aux exigences du marché et sur la réalisation des divers travaux de finition.

**Se reporter au paragraphe 5.11 du guide FABEM 6.1.**

> ***Rappel :*** *lorsque les travaux concernent un* ***renforcement structural,*** *lors de la réception des travaux il convient de s'assurer que le renforcement participe effectivement à la reprise des efforts.* ***Le marché*** *doit spécifier les essais à effectuer pour en apporter la preuve.*

Normalement, si les résultats des contrôles effectués lors de la mise en œuvre des boulons d'ancrage, ou des broches ou des tirants d'enserrement sont satisfaisants, cela peut suffire pour permettre la réception des travaux.

Si lors des études préliminaires, certaines fissures ont été équipées et que des mesures de leur souffle sous un chargement ou les variations thermiques ont été effectuées, le **marché** peut imposer que de nouvelles mesures soient effectuées sur les fissures injectées après mise en œuvre des renforcements.

# 5 Réparation structurale et/ou renforcement structural (contre-voûtes - contre-murs - ceinturages - réglages de la poussée)


**5.1** Généralités

**5.2** Documents de référence

**5.3** Réparation et/ou renforcement par contre-voûtes – domaine d'application - limites d'emploi

**5.4** Réparation et/ou renforcement par ceinturages – domaine d'application - limites d'emploi

**5.5** Réparation et/ou renforcement par contre-murs – domaine d'application - limites d'emploi

**5.6** Réparation et/ou renforcement par réglages de la poussée des voûtes - domaine d'application - limites d'emploi

**5.7** Choix des produits et matériaux - matériels nécessaires - contrôles et essais

**5.8** Réception des travaux (pour mémoire)




UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / JUIN 2011

**Une structure en maçonnerie** peut présenter **des insuffisances structurales** créées par des désordres affectant les fondations, les matériaux… ou dues à une **modification des conditions d'exploitation** (par exemple : élargissement de la chaussée, passage de convois exceptionnels très lourds, construction nouvelle à proximité, surhaussement d'un mur de soutènement…).

**La réparation et/ou le renforcement de la structure en maçonnerie** affectée par des insuffisances structurelles peut faire appel à la **construction d'une nouvelle structure contre la précédente** qui doit être capable de résister à tout ou partie des charges appliquées.

**> Cette nouvelle structure peut être :**

- **solidaire** de la structure initiale par adhérence ou connexion ;
- **ou indépendante** de la structure initiale et, dans ce cas, être dimensionnée pour encaisser la totalité des charges permanentes et d'exploitation.

**Le projet de réparation et/ou renforcement** doit, bien entendu, s'assurer que la **fondation** puisse reprendre les charges existantes, voire les nouvelles charges, dont le poids propre de la structure additionnelle. Dans le cas contraire, le projet doit intégrer le renforcement de la fondation.

**Un tel projet de réparation et/ou renforcement** doit être mis au point pendant la **période des études préalables** au lancement de la **consultation** et relève de la compétence du **bureau d'études** retenu. Ce projet est basé sur les résultats des investigations effectuées sur l'ouvrage existant, en particulier, celles faites à la demande du bureau d'études et en tenant compte des contraintes formulées dans le **programme du maître d'ouvrage.**

***La solution de réparation ou de confortement** doit être obligatoirement comparée **à la solution de démolition reconstruction.** Par exemple, cette dernière est souvent intéressante pour les petits ponts à une ou deux travées de petite portée, d'autant qu'elle permet d'augmenter le débouché de l'ouvrage vis-à-vis des crues.*

Il n'est pas question de développer dans le détail la conception et la réalisation de telles réparations ou renforcements, car chaque cas est un cas particulier. Il est seulement possible de donner des conseils, des principes et quelques exemples de réalisation, avec les critères de choix que sont leurs avantages et inconvénients.

**> Les paragraphes qui suivent détaillent les différentes solutions qui sont mises en œuvre classiquement, voire exceptionnellement, pour renforcer les voûtes, les appuis (piles et culées), les murs… à savoir :**

- **1. les contre-voûtes ;**
- **2. les ceinturages ;**
- **3. les contre-murs ;**
- **4. les réglages de la poussée des voûtes (utilisation très exceptionnelle).**

**Les matériaux composites** (tissus de fibres de verre ou de carbone, plaques [pultrudés] de fibres de carbone) peuvent être utilisés pour la réparation et le renforcement des ouvrages en maçonnerie et tout particulièrement pour le renforcement de bâtiments en zone sismique. En l'absence de recommandations spécifiques relatives à la maçonnerie, il convient de se reporter aux **avis techniques du CSTB, aux recommandations provisoires de l'AFGC de 2007 et au guide FABEM 7.**

***NOTA :*** *ce paragraphe ne traite pas du choix des matériaux (profilés métalliques, armatures de béton armé ou de béton précontraint, bétons normaux…) Se reporter aux paragraphes précédents du présent guide et aux fascicules des CCTG et aux CCTP types du SETRA (ouvrages neufs et réparations) pour la rédaction du* ***marché****.*

- **J. Bourcy :** Rédaction des projets d'ouvrages d'art – Fascicule n°1 : Généralités et ponts en maçonnerie (cours de l'ENSM à Nantes 1954) ;
- **Bulletins d'information n°1 et n°2 :** Incidents sur ouvrages, diffusés par le SETRA dans les années 80 pour le compte de la Direction des Routes et de la Circulation Routière ;
- **le fascicule n°8** relatif aux maçonneries d'ouvrages d'art de la collection : Les techniques de réparation des ouvrages en béton, document paru en juin 1987 ;
- **F. Bourgeois, M.-C. Raymond, C. Dutemps C. Bonvalet et F. Nelva :** Renforcement de voûtes en maçonnerie par coques en béton projeté, document paru dans les annales de l'ITBTP n°464 de mai 1988 ;
- **la norme NF P 95-107 :** Réparation et renforcement des maçonneries (avril 2002) ;
- **Un siècle de génie civil,** rassemblant les exposés de la conférence du 12 décembre 2000 intitulée : un siècle et demi de béton en France (AFGC) ;
- **P. Vion et D. Poineau :** L'expertise et la réparation du pont en maçonnerie sur le Loup à Villeneuve-Loubet (ARCH' 01 troisième conférence internationale sur les ponts en arc à Paris – Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées) ;
- **P. Vion et D. Poineau :** Repair and widening of the Villeneuve-Loubet Bridge France (Structural Engineering International : volume 18 de novembre 2008).


Parmi les documents utilisés pour la rédaction de ce paragraphe sur les réparations et renforcements il faut aussi signaler : Les techniques de réparation des ouvrages en maçonnerie, rédigées par J.-L. Michotey dans le cadre des formations continues de Ponts Formation Éditions.

# 5.3.1 LES DIFFÉRENTES SOLUTIONS DE RÉPARATION ET/OU RENFORCEMENT DES VOÛTES PAR CONTRE-VOÛTES

**La structure additionnelle,** appelée **«contre-voûte»**, est disposée le plus souvent sous l'intrados de la voûte existante **avec ou sans liaison** avec celle-ci. **Elle peut aussi être placée à son extrados.**

### > 1. Une contre-voûte en béton armé sous l'intrados et liée à la voûte existante peut être réalisée par :

- coulage d'un béton en place dans un coffrage classique ;
- projection du béton par voie sèche ou humide ;
- coulage d'un béton en place dans un coffrage perdu participant ou non (buse métallique ou à base de matériaux composites fibrés).

La liaison entre les deux structures, si elle est nécessaire, est, normalement, assurée par des armatures de béton armé (broches et épingles) scellées dans la maçonnerie.

***RAPPEL :*** *le scellement d'une armature de béton armé dans la maçonnerie ne peut garantir celle-ci contre la corrosion ad vitam æternam.* ***Le recours à des matériaux non-corrodables*** *est une solution nettement plus coûteuse mais beaucoup plus durable.*

### > 2. Une contre-voûte en maçonnerie (pierres ou briques) sous l'intrados de la voûte existante peut être réalisée par :

- montage sur un cintre d'une maçonnerie hourdée sur toute la largeur de la voûte existante ou sous forme de plusieurs rouleaux.

Cette solution coûteuse et délicate à exécuter permet de conserver l'esthétique de l'ouvrage. Cette solution ressemble à celles des contre-voûtes indépendantes visées ci-après. Cette solution ne fait pas l'objet d'un développement dans la suite du présent paragraphe, il convient de se reporter à la 1ère partie du présent guide qui traite de la reconstruction partielle ou totale de parties d'ouvrage.

### > 3. Une « contre-voûte » sous l'intrados et indépendante de la voûte existante peut être réalisée par :

- des profilés ou des voussoirs métalliques enrobés ou non de béton ;
- une coque préfabriquée en béton armé d'une seule pièce ou en plusieurs anneaux.

**> 4. Une contre-voûte en béton sur l'extrados et liée à la voûte existante peut être réalisée par :**

- coulage traditionnel du béton en place directement sur l'extrados de la voûte après décaissement.

Les détails de la conception des différentes solutions de contre-voûtes peuvent aussi être recherchés dans les articles relatifs au **renforcement des tunnels,** en tenant compte de la spécificité de ces derniers :

- il n'est, en effet, pas possible de mettre en place une chape d'étanchéité sur l'extrados de la voûte du tunnel,
- il est possible de mettre en place des boulons d'ancrage dans le terrain encaissant (la mise en place de boulons d'ancrage provisoires scellés peut cependant être envisagée pour certaines voûtes surmontées par un remblai de forte épaisseur et de bonne qualité, par exemple constitué de pierres cassées).

## 5.3.2 CHOIX DU TYPE DE CONTRE-VOÛTE À METTRE EN ŒUVRE

**> Ce choix va dépendre de l'état de la voûte et de son intrados et du débouché nécessaire pour le passage des véhicules ou des crues :**

- **si la stabilité de la voûte est en jeu à très court terme** (présence de fractures, de déformations, de chute de moellons…), la mise en place d'une structure indépendante, par exemple sous forme de profilés métalliques qui seront ensuite enrobés de béton pour les protéger de la corrosion, peut être la bonne solution ;
- **si la stabilité de la voûte n'est pas en jeu immédiatement et si le débouché sous l'ouvrage peut être réduit,** la solution de la contre-voûte en béton armé coulé en place ou projeté est à retenir. Un rescindement partiel de l'intrados de la voûte en maçonnerie peut permettre de réduire au maximum l'emprise de la contre-voûte ;
- **si la stabilité de la voûte n'est pas en jeu immédiatement, si l'intrados est en mauvais état et si le débouché sous l'ouvrage peut être réduit,** la solution de la contre-voûte en béton armé coulé avec une buse coffrante est une solution variante à la précédente ;
- **si la stabilité de la voûte n'est pas en jeu immédiatement et si le débouché sous l'ouvrage doit être intégralement conservé,** la solution de la contre-voûte en béton armé coulé en place sur l'extrados de la voûte peut être la bonne solution.

***ATTENTION :*** *la réalisation d'une contre-voûte sous l'intrados de la voûte existante impose obligatoirement la remise en état* ***des dispositifs de drainage et de la chape d'étanchéité.*** *La non réalisation de ces deux opérations risque de transformer la voûte en «piscine», prélude à de graves dommages.*

## 5.3.3 NÉCESSITÉ D'APPUYER LA CONTRE-VOÛTE

Il faut que la **contre-voûte soit impérativement appuyée sur la structure existante** pour permettre la transmission de ses **réactions d'appui** aux fondations (un renforcement de ces dernières peut être nécessaire). Bien entendu, cela ne concerne pas la contre-voûte réalisée sur l'extrados d'une voûte existante. L'appui est réalisé, soit par des corbeaux, soit par une longrine plaquée sur le fût de la pile ou le mur de front de la culée.

***Photo n° 70 : longrine d'appui en partie basse de la contre-voûte préfabriquée du pont de Levallois*** *(crédit-photo D. Poineau)*

L'angle d'inclinaison «α» de la résultante R des forces appliquées (réaction d'appui «N» de la contre-voûte, poids «G» de la longrine d'appui et forces exercées «P» par les barres de précontrainte) sur la surface d'appui de la longrine «AB» doit respecter le **critère de Coulomb** afin d'éviter tout glissement. De plus, cette résultante doit être centrée sur cette surface d'appui, de façon que les contraintes de compression soient sensiblement uniformes tout en restant inférieures à la contrainte limite admise sur la maçonnerie de l'ouvrage…

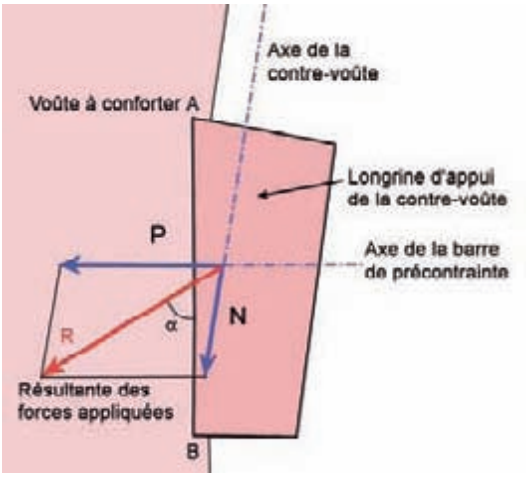



***Figure n° 56 : composition des forces (par simplification, le poids de la longrine a été négligé)***

# 5.3.4 CAS DES CONTRE-VOÛTES DISPOSÉES À L'INTRADOS DE LA VOÛTE EXISTANTE

## 5.3.4.1 Description de la contre-voûte indépendante réalisée par des profilés métalliques

Pour la réalisation d'une telle contre-voûte, sont utilisés des profilés métalliques (HEA, HEB…) qui sont cintrés à la demande à partir d'un relevé de la géométrie de l'intrados de la voûte et qui doivent être contreventés par des entretoises métalliques (par exemple, des tiges métalliques filetés et boulonnées). Des cales métalliques réglables permettent d'assurer le contact entre la voûte et les profilés métallique. Ce calage est complété par la mise en place d'un mortier de calage (se reporter au **guide FABEM 1**) pour combler les vides.

La base des arcs formés par les profilés métalliques doit reposer sur un corbeau ou une longrine par l'intermédiaire de cales métalliques ou d'un mortier maté. Le corbeau doit être solidarisé aux fûts de piles ou aux culées, ce qui permet de transmettre les charges aux fondations des appuis (se reporter à la photo de la contre-voûte du pont de Levallois).

Cette méthode de confortement est aussi classiquement utilisée pour le renfort des tunnels (consulter les **guides de L'AFTES**).

**> La réalisation d'une contre-voûte indépendante à base de profilés métalliques présente les avantages suivants :**

- le dimensionnement des profilés est simple, puisqu'il s'agit d'arcs à 2 ou 3 articulations chargés au droit des calages ;
- la sécurité est assurée et est même surabondante, car la voûte en maçonnerie continue de reprendre une partie des charges ;
- la réalisation est rapide et sans grosses difficultés.

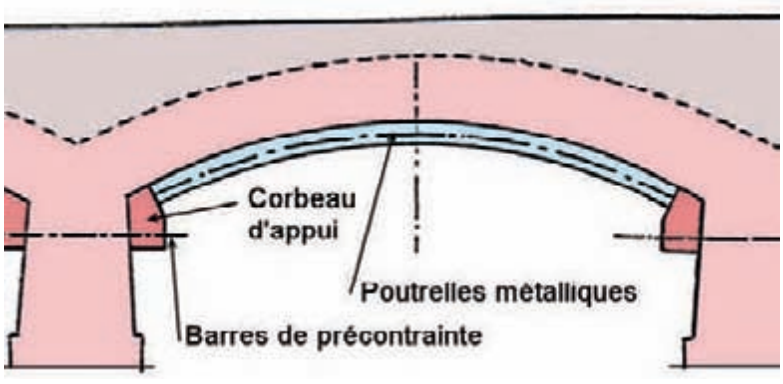



***Figure n° 57 : schéma de principe d'une contre-voûte à base de profilés métalliques***

**> La réalisation d'une contre-voûte indépendante à base de profilés métalliques présente les inconvénients suivants :**

- la réduction du débouché sous l'ouvrage ;
- un aspect esthétique peu sympathique, voire inquiétant si l'étaiement n'est pas enrobé par du béton ;
- l'obligation de mettre en place un platelage (métallique) entre les arcs si la voûte est très dégradée (cependant, des réparations locales de la voûte en maçonnerie peuvent se subsituer au platelage) ;
- l'obligation d'une protection contre la corrosion ;
- des dilatations différentielles entre la maçonnerie et les arcs métalliques dues à des inerties thermiques différentes ;
- des coupures de circulation lors de la réfection de la chape d'étanchéité et des dispositifs de drainage, si besoin est.

**La protection contre la corrosion peut se faire en deux fois :** en premier, par une galvanisation à chaud des profilés et, en second, après pose du cintre par l'enrobage des profilés dans un béton coulé en place ou projeté et armé par un ferraillage adapté.

**L'enrobage par du béton** présente l'avantage **d'augmenter l'inertie thermique de la contre-voûte** et de permettre une homogénéisation des dilatations de la voûte en maçonnerie et de la structure additionnelle.

## 5.3.4.2 Description de la contre-voûte indépendante préfabriquée en béton armé

Il s'agit de réalisations exceptionnelles demandant une forte technicité de l'entreprise. Un des exemples les plus marquants concerne le viaduc d'accès du pont de Levallois dont des illustrations figurent dans le présent guide. Des voûtes de cet ouvrage étaient fracturées suite à des mouvements de fondations qui avaient fait l'objet de réparations avant le confortement des voûtes.

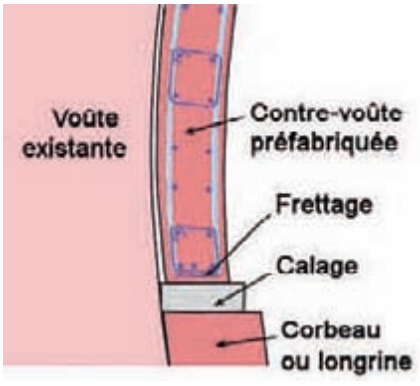



*Figure n° 58 : détail de l'appui de la contre-voûte préfabriquée*

Pour la réalisation d'une telle contre-voûte, il faut commencer par préfabriquer une coque en béton armé adaptée à la géométrie de l'intrados de la voûte et, normalement, la plus mince possible pour réduire la réduction du débouché sous l'ouvrage. Cette coque est ensuite ripée transversalement sous la voûte existante pour venir reposer sur des corbeaux cloués sur les fûts des piles ou les culées. **Des niches à vérins** permettent de régler la position de la coque.

***Photo n° 71 : déplacement de la contre-voûte préfabriquée*** *(crédit photo D. Poineau)*

Cette coque est dimensionnée pour supporter la totalité des charges en prenant comme hypothèse que le chargement est «pseudo-radial». Cette hypothèse impose un possible glissement entre la voûte en maçonnerie et la coque. Un dispositif permettant le glissement est à mettre en place entre l'extrados de la coque et l'intrados de la voûte. Dans le cas du **pont de Levallois**, il était constitué par une sorte de vessie remplie de graisse et fabriquée à bases de feuilles de plastique soudées ensemble.

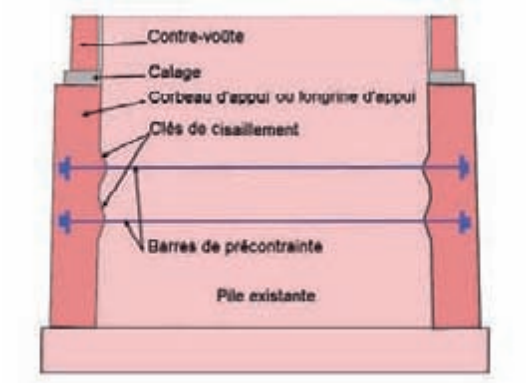



***Figure n° 59 : principe de réalisation de corbeaux ou d'une longrine d'appui avec clés de cisaillement***

***NOTA :*** *les clés de cisaillement permettent une meilleure reprise des efforts de glissement entre les corbeaux ou les longrines et le fût de la pile.*

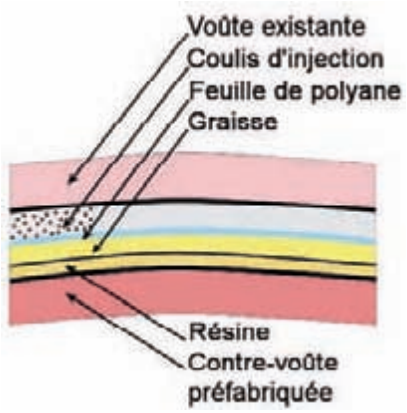



*Figure n° 60 : dispositif de glissement de la contre-voûte du pont de Levallois*

**> Avantages :**

- son efficacité alliée à son esthétique ;
- une bonne adaptation à des voûtes de portée moyenne ;
- une durabilité assurée pour de nombreuses années sans aucun entretien vis-à-vis de la corrosion.

**> Inconvénients :**

- un coût élevé (études et travaux) ;
- entreprise et bureau d'études de haute technicité ;
- la réduction du débouché sous l'ouvrage ;
- des coupures de circulation lors de la réfection de la chape d'étanchéité et des dispositifs de drainage, si besoin est.

**> Les progrès techniques récents devraient pouvoir être appliqués à la réalisation d'une telle coque :**

- par exemple, les bétons fibrés déjà utilisés dans les renforcements d'ovoïdes et, mieux encore, le BFUP ;
- certains des produits, utilisés dans les amortisseurs visqueux pour réduire les vibrations et les déplacements, qui ont la propriété de pouvoir changer de consistance, devraient pouvoir être employés comme matériaux d'interface entre la coque et la voûte.

## 5.3.4.3 Description de la contre-voûte en béton armé liée à la voûte et dont le béton est coulé en place ou projeté

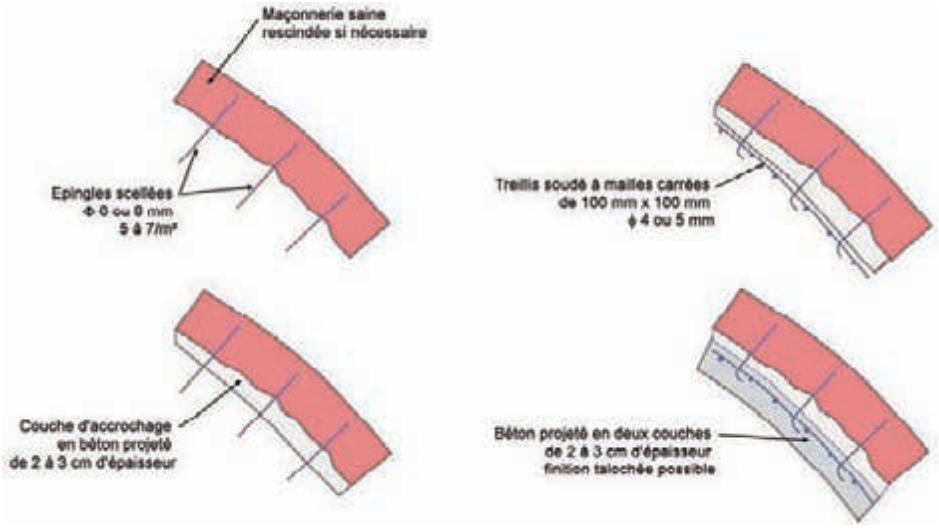

Maçonnerie saine
rescindée si nécessaire
Epingles scellées
Ø 6 ou 8 mm
5 à 7/m²
Treillis soudé à mailles carrées
de 100 mm x 100 mm
ϕ 4 ou 5 mm
Couche d'accrochage
en béton projeté
de 2 à 3 cm d'épaisseur
Béton projeté en deux couches
de 2 à 3 cm d'épaisseur
finition talochée possible

***Figure n° 61 : contre-voûte mince en béton projeté***

La mise en œuvre du béton peut être réalisée par coulage en place ou par projection. La mise en œuvre par projection, qui bénéficie de l'absence d'un coffrage, est la méthode la plus utilisée.

> ***Rappel :*** *le renforcement par contre-voûtes, tout particulièrement en béton projeté, a fait l'objet d'une étude dans les années 80 par la SNCF, le CERTU, la RATP, le CEBTP et le SETRA. Les résultats de cette étude sont disponibles dans un article de* ***F. Bourgeois, M. C. Raymond, C. Dutemps C. Bonvalet et F. Nelva*** *paru dans les* ***annales de l'ITBTP n°464 de mai 1988*** *intitulée : Renforcement de voûtes en maçonnerie par coques en béton projeté (se reporter à* ***l'annexe 2*** *[FABEM 6.4]).*
>
> *Au cours de cette étude, des voûtes en plein cintre de 8 m d'ouverture modélisant des voûtes réelle avec un coefficient de réduction au 1/3,6 ont été chargées jusqu'à fissuration, puis renforcées par une coque mince en béton projeté. Les voûtes réparées ont de nouveau été chargées jusqu'à fissuration puis rupture.* ***Ces essais ont montré*** *que la rigidité d'une des voûtes en maçonnerie avait été augmentée de 250 % par la coque de renfort, avec une augmentation très nette de la charge de rupture.*

**Depuis, le béton projeté traditionnel armé ou fibré** est utilisé couramment, non seulement pour la réparation et le renforcement de voûtes en maçonnerie, mais aussi de tunnels, de collecteurs d'eau usée…

Si l'intrados de la voûte peut être considéré comme en bon état et ne nécessitant de rescindement de la maçonnerie, la mise en place par projection d'une couche de béton de moins de dix centimètres (10 cm) suffit. Dans le cas contraire, la couche à mettre en place peut atteindre une quinzaine de centimètres (15 cm).

**Le calcul traditionnel** n'est pas utilisable pour prendre en compte les retraits différentiels et les effets thermiques dans la voûte composite constituée de maçonnerie et de béton. Cependant, **le programme voûte du SETRA** (se reporter à **l'annexe 2** [FABEM 6.4]) permet de modéliser une telle structure pour s'assurer de sa sécurité à rupture.

Pour le calcul et le dimensionnement des parties en béton projeté, le lecteur est invité à consulter **le site ASQUAPRO** afin d'obtenir de plus amples informations, **d'autres articles de référence** et les méthodes de calcul du béton projeté traditionnel ou fibré.

**> Avantages :**

- la solution est classique et sans grosses difficultés, même si la projection du béton ne s'improvise pas.
- si l'intrados de la voûte en maçonnerie est en mauvais état, il se trouve réparé ;
- la réalisation est rapide.

**> Inconvénients :**

- la nécessité de coffrages si le béton n'est pas projeté et les difficultés de bétonnage au plafond (se reporter aux techniques de bétonnage des tunnels ou prévoir des cheminées de bétonnage dans la voûte) ;
- des coupures de circulation pour les poids lourds, si le béton est projeté, peuvent être nécessaires jusqu'au durcissement du béton ;
- la réduction du débouché sous l'ouvrage ;
- des coupures de circulation lors de la réfection de la chape d'étanchéité et des dispositifs de drainage, si besoin est.

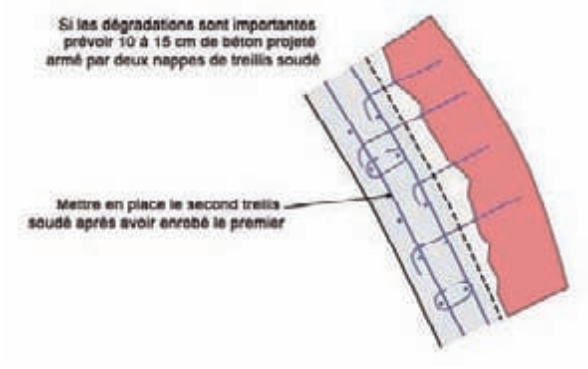

Si les dégradations sont importantes prévoir 10 à 15 cm de béton projeté armé par deux nappes de treillis soudé
Mettre en place le second treillis soudé après avoir enrobé le premier

*Figure n° 62 : contre-voûte épaisse en béton projeté*

## 5.3.4.4 Description de la contre-voûte en béton liée à la voûte existante avec buse coffrante

**Cette technique met en œuvre une buse métallique** ou, mieux, **une buse en matériaux composites fibrés** (non corrodable) d'un diamètre inférieur à celui de la voûte. Des éléments de buses peuvent aussi être utilisés. La buse est glissée à l'intérieur de la voûte à renforcer. Ensuite, le vide d'au moins 10 à 20 cm entre l'extrados de la buse, l'intrados de la voûte et ses piédroits est rempli de béton (la composition du béton doit en limiter le retrait au maximum). Le bétonnage peut être réalisé, soit par des cheminées de bétonnage forées dans la voûte, soit au travers de la buse, ce qui est une technique analogue à celle utilisée dans les tunnels. De plus, une **injection de clavage** pour boucher les vides et compenser les effets du retrait du béton est nécessaire. Il est conseillé d'armer au moins les bords de la contre-voûte pour y éviter la formation de fissures parallèles à ses génératrices longitudinales et, aussi, de sceller dans la maçonnerie des épingles de liaison comme dans le cas du béton projeté. Dans cette technique, la buse n'a qu'un rôle, celui de coffrage.

En milieu hydraulique, il faut réaliser en plus un ouvrage d'entonnement à l'amont ainsi que des parafouilles. De même, il faut reprendre les murs latéraux de la voûte pour éviter des affouillements.

***Photo n° 72 : coffrage avec des éléments de buse, ici uniquement au niveau de la base des voiles en béton armé de renforcement des murs tympan*** *(crédit photo Michel Daugreilh)*[17]

**> Avantages :**

- la solution permet de traiter un intrados désorganisé sans avoir besoin de procéder à un rescindement des partie endommagées ;
- la solution est classique, sans grandes difficultés, même si un bon remplissage en béton n'est pas évident.

**> Inconvénients :**

- la réduction du débouché sous l'ouvrage, qui est importante ;
- la tenue vis-à-vis de la corrosion dans le cas d'utilisation d'une buse coffrante métallique.

[17] *ATTENTION, la solution de renforcement par des voiles de béton armé susvisée impose un drainage parfait des eaux pour éviter de transformer l'ouvrage en piscine !*

# 5.3.5 CAS DE LA CONTRE-VOÛTE LIÉE À LA VOÛTE EXISTANTE ET DISPOSÉE À L'EXTRADOS DE LA VOÛTE EXISTANTE

La réalisation d'une contre-voûte à l'extrados n'est envisageable que dans le cadre d'un renforcement d'une voûte pour en augmenter la force portante. La thèse détaillée dans **l'annexe 2 [FABEM 6.4]** montre que l'augmentation de la charge portante est obtenue par le déplacement vers le haut de la courbe des pressions, ce qui se traduit, dans le modèle de calcul, par l'apparition de tractions en fibre inférieure.

Une telle solution améliore la qualité de liaison du queutage de la maçonnerie à la partie supérieure de la voûte, souvent en moellons ordinaires. Elle permet d'obtenir une surface capable d'accueillir une chape d'étanchéité en position basse. Il faut, bien entendu, que la surépaisseur soit compatible avec le profil en long de la chaussée. Pendant le bétonnage, la voûte supporte un supplément de charges **qui impose un relatif bon état de la voûte et de son intrados** pour qu'elle puisse encaisser ce chargement. Les fondations doivent aussi être capables de supporter les charges supplémentaires (l'utilisation de granulats légers peut permettre de réduire le poids mort supplémentaire).

***REMARQUE :*** *la totalité du matériau de remplissage est parfois remplacée par du béton. Cette façon de procéder n'est pas très rationnelle, même si elle ne semble pas avoir entraîné de désordres, car une voûte est faite pour fonctionner en voûte. Cependant, si la hauteur disponible pour le remblai à la clé est de moins de 40 à 50 cm et si la ou les voûte(s) sont très surbaissées, il est possible de remplacer complètement le remblai par du béton.*

**> Avantages :**

- la technique de réalisation fait appel aux méthodes traditionnelles d'exécution du béton armé ;
- les travaux s'effectuent dans de bonnes conditions sans être gêné par les contraintes hydrauliques liées aux périodes de crue et un travail au plafond ;
- les travaux incluent le remise en état de l'extrados de la voûte et, si besoin est, ils peuvent porter sur les tympans ;
- la surface de la contre-voûte permet la mise en place de la **chape d'étanchéité** dans les meilleures conditions possible ainsi que la **réalisation du drainage** de l'extrados (se reporter à la 7ème partie du guide FABEM 6.2 relative à la protection contre les eaux).
- etc.

**> Inconvénients :**

- la nécessité d'un bon état relatif de la voûte et de son intrados (absence de joints ouverts, de décompression locale de voussoirs, de chute de briques ou de moellons…) ;
- le décaissement de la voûte est nécessaire, ce qui impose, normalement, l'interruption de la circulation sur l'ouvrage ;
- le décaissement est une opération délicate, qui peut entraîner une instabilité de la voûte (arcs brisés…), voire des appuis (ouvrage à plusieurs travées)…

***REMARQUE :*** *pour maintenir une circulation alternée, sur un pont étroit, il n'est, normalement, pas conseillé de procéder à la réalisation de la contre-voûte par demi-chaussée, à cause de la nécessité d'assurer par des armatures en attente la liaison entre les demi-voûtes en béton, ce qui complique l'exécution des travaux. En outre, il faut maîtriser la fissuration du béton au droit de la reprise de bétonnage sous les effets du retrait du béton.*

## 5.3.6 RÉALISATION DES TRAVAUX DE CONSTRUCTION DES CONTRE-VOÛTES

**> Seules les trois solutions suivantes les plus classiques sont traitées :**

- la réalisation d'une contre-voûte à l'intrados de la voûte existante à base de profilés métalliques enrobés ou non de béton ;
- la réalisation d'une contre-voûte en béton armé à l'intrados de la voûte existante, soit de faible épaisseur, soit de forte épaisseur ;
- la réalisation d'une contre-voûte sur l'extrados de la voûte existante par béton coulé en place.

### 5.3.6.1 Réalisation d'une contre-voûte indépendante réalisée par des profilés métalliques

La phase d'exécution la plus intéressante concerne la réalisation de l'appui du cintre métallique. Deux exemples d'application sont développés ci-après. La réalisation de la contre-voûte en béton projeté qui enrobe, si besoin est, le cintre métallique est détaillé dans le paragraphe qui suit consacré aux contre-voûtes en béton armé.

**> Premier cas :**

La figure ci-après montre l'appui d'un cintre sur une longrine plaquée sur le fût de la pile par des barres de précontrainte. Les encoches réalisées dans la maçonnerie jouent le rôle de clés et empêchent tout glissement de la longrine.

Ce cintre est constitué par des HEA 100 espacés d'environ 0,50 m entretoisés par des tiges métallique de 20 mm de diamètre. Le cintre repose sur la longrine par l'intermédiaire de deux platines séparées par des cales métalliques pour permettre la mise en œuvre d'un mortier de calage. Après durcissement du mortier les boulons de liaison sont serrés et bloqués.

Ce cintre provisoire permet de maintenir le trafic sur l'ouvrage. Il est ensuite incorporé dans la contre-voûte en béton projeté.

Le béton projeté d'enrobage du cintre est armé par un quadrillage d'armatures de béton armé de 10 mm de diamètre fixé sur des épingles scellées dans la maçonnerie.

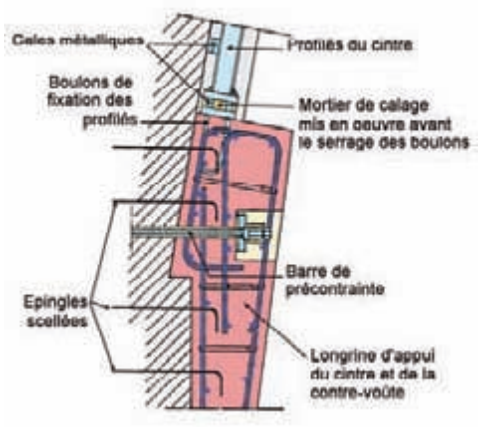

Cales métalliques
Profilés du cintre
Boulons de fixation des profilés
Mortier de calage mis en œuvre avant le serrage des boulons
Barre de précontrainte
Epingles scellées
Longrine d'appui du cintre et de la contre-voûte

***Figure n° 63 : détail de l'appui de la contre-voûte à base de profilés métalliques***
*(extrait du bulletin n°2 : Incidents sur ouvrages - fiche n° 1.2)*

**> Deuxième cas :**

La figure ci-après montre l'appui d'un autre cintre sur une longrine plaquée sur le fût de la pile par des barres de précontrainte.

Ce cintre est constitué par des HEA entretoisés comme dans le cas précédent. Le cintre repose sur la longrine par l'intermédiaire d'une seule platine appuyé sur un dispositif réglable. Un fois le cintre en place, un mortier de calage est mis en œuvre entre le corbeau d'appui et la platine. Après durcissement, les boulons sont serrés et bloqués. Le cintre est ensuite enrobé par un béton projeté, comme dans le cas précédent.

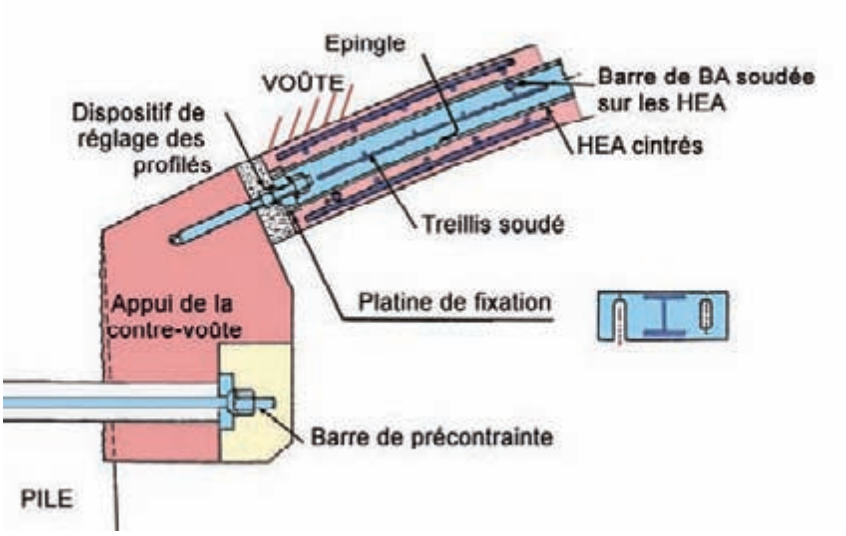



***Figure n° 64 : contre-voûte à base de profilés métalliques enrobés de béton*** *(document fourni par JL. Michotey)*

## 5.3.6.2 Réalisation d'une contre-voûte en béton armé de faible épaisseur réalisée à l'intrados de la voûte existante

**> La procédure d'exécution comprend les opérations suivantes :**

- **un relevé contradictoire de l'état de l'ouvrage** et, en particulier, de l'intrados des voûtes à réparer et/ou renforcer ;
- le nettoyage des surfaces qui doivent être ré-humidifiées et ressuyées pour la projection ;
- le percement ou la remise en état des dispositifs de drainage ;
- le scellement de broches ou plutôt d'épingles (7 à 8 barres de 6 à 8 mm de diamètre par mètre carré) ;
- la réalisation d'une couche d'accrochage de 2 à 3 cm d'épaisseur (utilisation d'un micro-béton) ;
- la mise en place d'un treillis soudé à mailles carrées de 100x100 avec des fils de 4 à 5 mm de diamètre ;
- une nouvelle projection de béton en deux passes de 2 à 3 cm d'épaisseur, séparées par un laps de temps pour permettre le durcissement de chaque couche ;
- une couche de finition talochée d'environ 2 cm d'épaisseur, si le **marché** le prévoit ;
- une cure soignée pour éviter la fissuration par retrait.

***Photo n° 73 : scellement des épingles au pont de Favernay*** *(crédit photo DDE 70)*

***NOTA :*** *sur la photographie, notez les cales provisoires de blocage des moellons.*

La figure ci-après est extraite des plans de renforcement du pont d'ILLIERS sur le Loir situé sur la RD 921 en Eure et Loir.

Il est préférable de procéder à la **réfection de la chape d'étanchéité** avant de procéder à la réparation et/ou au renforcement, de façon à empêcher toute percolation d'eau dans la maçonnerie. Eau qui pourrait s'accumuler à l'interface entre le béton projeté et l'intrados de la voûte en maçonnerie et provoquer des décollements.

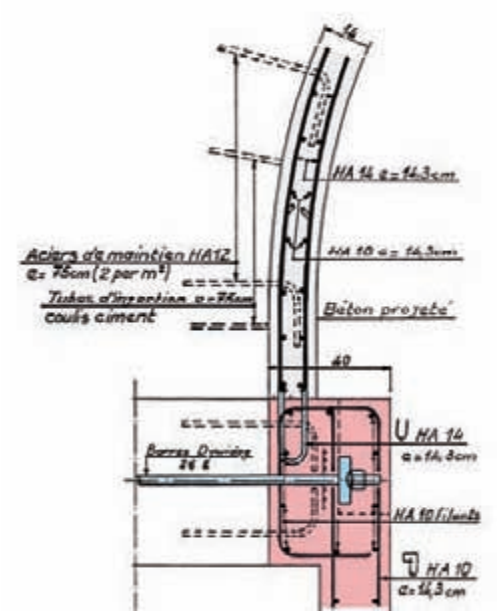



***Figure n° 65 : exemple de ferraillage d'une contre-voûte*** *(document fourni par JL. Michotey)*

## 5.3.6.3 Réalisation d'une contre-voûte en béton armé de forte épaisseur réalisée à l'intrados de la voûte existante

***Photo n° 74 : rescindement de la voûte endommagée du pont de Favernay*** *(crédit photo DDE 70)*

La **procédure** est très voisine de la précédente, sauf qu'ici, un **rescindement de l'intrados** est réalisé pour enlever la maçonnerie désorganisée. L'épaisseur de la voûte en béton est plus importante ce qui nécessite la mise en place de deux nappes de treillis soudé. Attention, la seconde nappe n'est mise en place que lorsque la première a été enrobée de béton ; cette façon de procéder limite au maximum les obstacles à la projection, ce qui réduit les retombées et facilite le remplissage.

***Photo n° 75 : contre-voûte en béton projeté du pont de Favernay terminée*** *(crédit photo DDE 70)*

## 5.3.6.4 Réalisation d'une contre-voûte en béton armé sur l'extrados de la voûte existante

**> Les études préalables ont permis :**

- d'avoir une idée de la géométrie de la voûte et de connaître la qualité du matériau de remplissage ;
- d'évaluer la stabilité de la voûte et des appuis lors du décaissement et lors de la réalisation de la contre-voûte ;
- de connaître l'état et la force portante des fondations[18].

La première opération à réaliser est un **relevé contradictoire de l'état de l'ouvrage** et la mise en place **de repères altimétriques** pour contrôler les mouvements éventuels de la structure.

***Photo n° 76 : état d'un extrados après décaissement et avant nettoyage*** *(crédit photo SETRA)*

**Le décaissement** doit être effectué avec le matériel adapté et en prenant les précautions qui s'imposent (se reporter à la 6ème partie du guide FABEM 6.2). Pour ne pas endommager l'extrados de la voûte, il faut terminer le décaissement manuellement dès que le queutage apparaît. Ensuite, **il faut nettoyer l'extrados** à l'eau sous pression, ce qui permet d'obtenir une bonne adhérence entre le béton et la maçonnerie.

À la fin de cette opération, un **nouveau relevé contradictoire de l'état de l'extrados** est à entreprendre de façon à adapter l'importance de la réfection de l'extrados de la voûte aux constatations (réfection locale avec remplacement de pierres ou de briques, si besoin est…).

[18] *Dans le cas où la force portante des fondations est limitée, le projet de réalisation de la contre-voûte doit avoir pour objectif de ne pas augmenter les descentes de charges.*

**La première phase de la réalisation de la contre-voûte** porte sur la mise en œuvre d'un micro-béton (ou d'un mortier) pour enrober le queutage de la voûte et régulariser la surface de l'extrados. Le micro-béton et la pierre ou la brique doivent être compatibles. Au minimum, il faut rendre la surface très rugueuse pour assurer une bonne reprise de bétonnage avec le béton de seconde phase. La mise en œuvre de broches scellées dans la maçonnerie améliore la liaison entre la contre-voûte et la voûte. Des broches horizontales peuvent aussi être disposées dans les tympans (voir la 4ème partie du présent guide). Si besoin est, les percements nécessaires au passage des évacuations des eaux sont à réaliser.

***REMARQUE :*** *si la surface de l'extrados est régulière, il est possible de s'affranchir de la première phase sauf du scellement des broches de liaison entre la voûte existante et la contre-voûte.*

**La seconde phase** consiste, après avoir mis en place le ferraillage et les dispositifs de drainage, à couler le béton de la contre-voûte dont l'épaisseur, le ferraillage et les formes de pente ont été fixés par le bureau d'études. Un talochage de finition rend la surface de l'extrados apte à recevoir la chape d'étanchéité. Une cure soignée, conforme aux dispositions du **fascicule 65 du CCTG**, est à mettre en œuvre après le bétonnage.

***ATTENTION :*** *l'examen des voûtes en béton non armée ou faiblement armé montre qu'une fissure largement ouverte se forme dans la section de clé, là où la section de béton est minimale. Les causes en sont les effets du retrait et des variations thermiques. Le ferraillage longitudinal de la contre-voûte doit donc être dimensionné pour rendre cet élément non fragile et, en conséquence, obtenir une fissuration fine et bien répartie. De plus, il est utile de prévoir un bétonnage par plots alternés qui permet de compenser une bonne partie des effets du retrait.*

**La troisième phase** concerne la mise en œuvre de la chape d'étanchéité sur l'extrados de la contre-voûte et les tympans (voir la 7ème partie du guide FABEM 6.2).

**La quatrième phase** correspond au remblaiement de l'ouvrage (voir 6ème partie du guide FABEM 6.2), à la réfection des superstructures, à la réalisation de la couche de roulement et aux travaux de finition et de remise en état des lieux.

## 5.4.1 DOMAINE D'APPLICATION

**Le ceinturage est réalisé par une structure, généralement fermée en cadre ou en anneau** qui enserre un ouvrage ou une partie d'ouvrage. Il concerne souvent, non seulement les appuis en maçonnerie, principalement les piles, voire certaines parties de culées, mais également les poteaux, voiles et murs de certains bâtiments.

**> Le ceinturage peut jouer deux rôles :**

- **celui de protection de surfaces** exposées aux chocs, érosions, effets mécaniques divers ainsi que contre les agressions hydrauliques ou atmosphérique ;
- **celui de frettage de maçonneries existantes,** qui présentent, par exemple, des fissures quasi verticales, ce qui contribue à assurer une meilleure stabilité de la structure. Le terme **«corset»** est souvent utilisé dans le cas du frettage.

***REMARQUE :*** *les tirants d'enserrement, objet d'une autre partie du présent guide, ont un rôle voisin du ceinturage.*

## 5.4.2 RÉALISATION D'UN CEINTURAGE DE PROTECTION

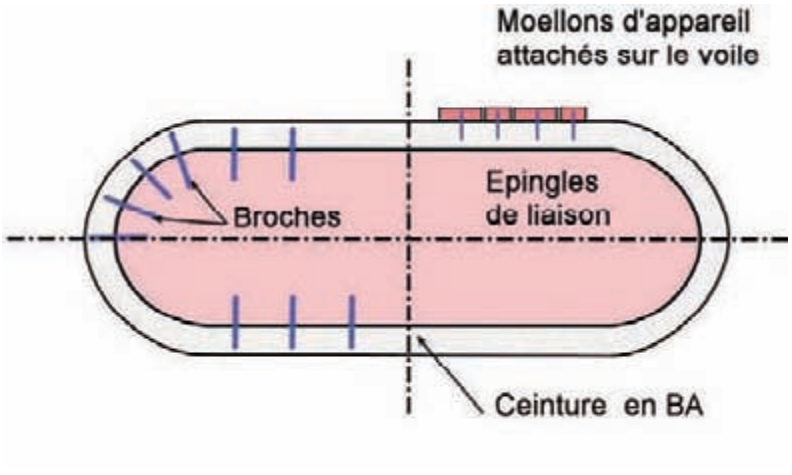



***Figure n° 66 : ceinturage de protection d'une pile en maçonnerie***

La figure ci-dessus montre un **ceinturage par un voile de béton armé** lié au corps de pile par des broches ou des épingles pour protéger une pile contre une abrasion ou des chocs. Si nécessaire, des **pierres attachées** formant coffrage peuvent être associées pour augmenter la tenue vis-à-vis des phénomènes susvisés, comme l'érosion.

La réalisation d'un tel ceinturage nécessite une préparation de la surface de la pile qui doit être nettoyée et débarrassée des parties friables pour offrir une bonne adhérence. Puis, généralement, des broches et des épingles sont scellées dans la maçonnerie pour lier le ceinturage au corps de pile et assurer le maintient du ferraillage du voile (ces liaisons ne sont pas indispensables). Ensuite, après avoir réalisé le ferraillage et le coffrage du voile, il est procédé à son bétonnage. Dans le cas d'une pile de longueur importante, pour limiter le risque de voir le voile se fissurer sous les effets des retraits, un coulage par plots alternés est à prévoir. Le béton peut aussi être mis en place par projection.

## 5.4.3 RÉALISATION D'UN CEINTURAGE DE FRETTAGE

### 5.4.3.1 Réalisation d'un ceinturage de frettage à l'aide de monotorons à titre provisoire, voire définitif

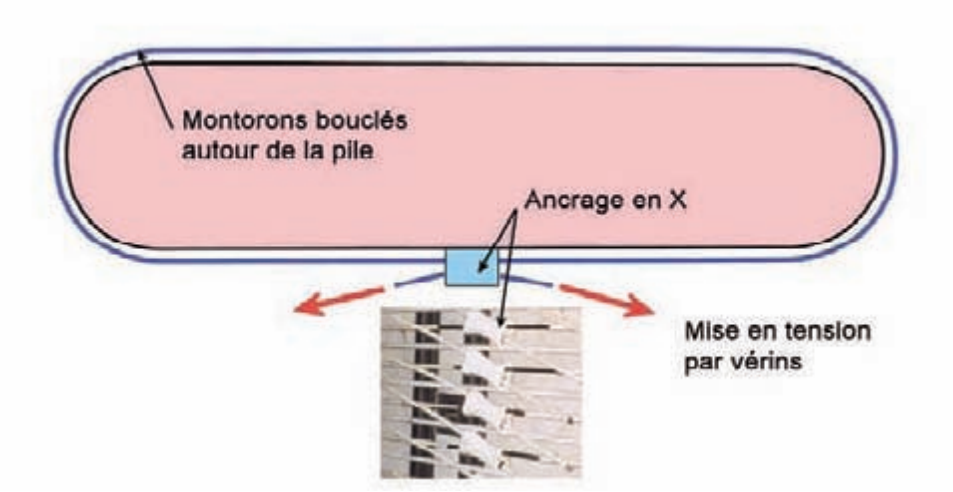



*Figure n° 67 : schéma de principe d'un ceinturage par monotorons*

En cas d'urgence, un ceinturage à base de monotorons gainés protégés peut être mis en place très rapidement. Les monotorons doivent être placés dans des gaines (tubes résistant aux hautes-pressions et qui sont utilisés dans les outils et machines hydrauliques) pour protéger la gaine du monotoron des frottements contre la maçonnerie lors des mises en tension.

Les ancrages des différents lits de monotorons sont placés alternativement sur une des faces de la pile, puis sur l'autre pour équilibrer le serrage.

Un tel corsetage provisoire peut être transformé en corsetage permanent si un voile de béton de protection est exécuté après la mise en tension des monotorons et si les ancrages y sont incorporés.

### 5.4.3.2 Réalisation d'un ceinturage de frettage à l'aide de câbles de précontrainte

Ici, le ceinturage fait appel à des câbles de précontrainte en U dont les ancrages sont alternativement positionnés à l'une des extrémités de la pile, puis à l'autre pour symétriser la précontrainte.

Après un nettoyage de la surface de la pile et un repiquage de la maçonnerie, le ceinturage est appuyé sur la maçonnerie par l'intermédiaire d'un mortier de calage pour bien répartir les pressions. Après mise en tension, les câbles sont incorporés dans un voile de béton de protection, coulé en place ou projeté, lié à la maçonnerie par des épingles ou des broches.

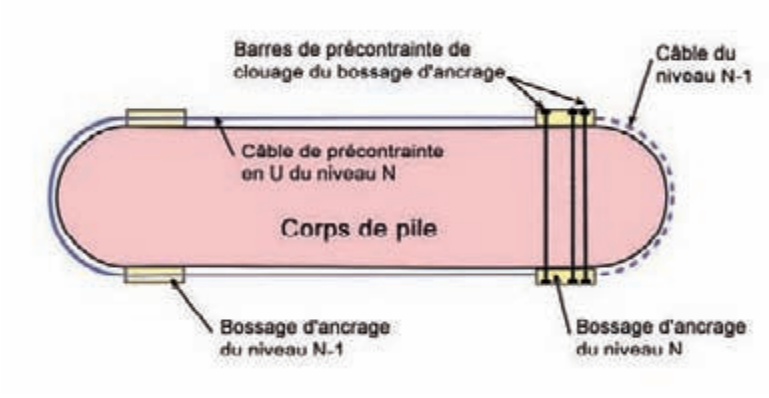

Barres de précontrainte de clouage du bossage d'ancrage
Câble du niveau N-1
Câble de précontrainte en U du niveau N
Corps de pile
Bossage d'ancrage du niveau N-1
Bossage d'ancrage du niveau N

*Figure n° 68 : schéma d'un ceinturage par câbles de précontrainte*

### 5.4.3.3 Réalisation d'un ceinturage de frettage métallique

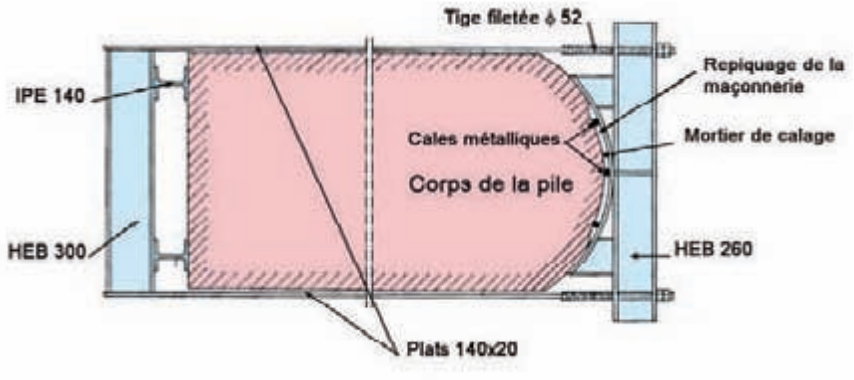



*Figure n° 69 : ceinturage métallique : vue en plan*

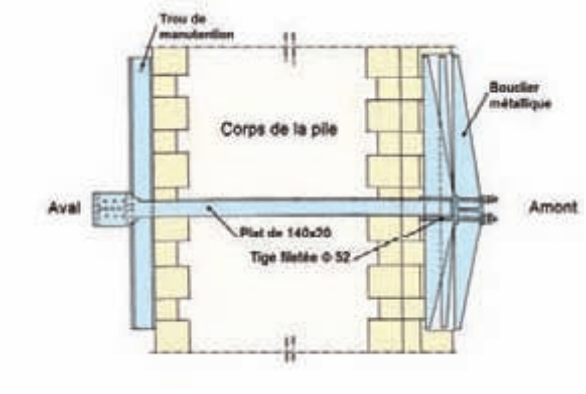



***Figure n° 70 : ceinturage métallique : vue en élévation***

Les figures ci-dessus montrent le ceinturage métallique mis en place sur le haut d'une pile en maçonnerie dont les deux faces opposées déversaient.

Un tel ceinturage impose que la pile ne soit pas soumise à des chocs. De plus, il est préférable que la ceinture règne dans la partie hors eau de la pile pour limiter les risques de corrosion.

Après un nettoyage de la surface de la pile et un repiquage de la maçonnerie, le ceinturage a été appuyé sur la maçonnerie par des cales et un mortier de calage a été mis en place entre le bouclier et la maçonnerie pour bien répartir les pressions. Une légère mise en tension de tiges filetées de réglage a été effectuée pour empêcher tout glissement ultérieur du bouclier.

Dans le cas ou la pile présenterait des fractures, celles-ci doivent être injectées avant la fin de la pose du corsetage.

***Photo n° 77 : vue du pont de Saint-Ouen et du ceinturage de la pile*** *(crédit photo J. Mossot -Structurae)*

Un tel ceinturage a été mis en place au pont de Saint-Ouen dans les années 80 (fiche II.1 du **bulletin d'information n°2 :** Incidents sur ouvrages, cité en référence). La photo de 2006 qui précède montre le bon comportement apparent de la réparation.

## 5.5.1 DOMAINE D'APPLICATION

**Le contre-mur a le même emploi que le ceinturage,** mais il concerne les structures linéaires dont une ou plusieurs faces ne sont pas accessibles et qu'il est donc impossible de ceinturer (par exemple, murs de soutènement, murs de culée…).

Un contre-mur peut jouer, soit **un rôle de protection,** soit **un rôle de renforcement** de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage présentant des désordres structurels.

***ATTENTION,*** *la remise en état des dispositifs de drainage et d'évacuation des eaux est obligatoirement liée à la construction d'un contre-mur, car ce dernier peut faire barrage aux eaux présentes à l'arrière du mur existant. De plus, une injection de la maçonnerie peut s'avérer nécessaire pour empêcher les eaux d'infiltration de traverser la maçonnerie et d'arriver à l'interface des deux structures où elles pourraient provoquer la corrosion des armatures de liaison ou le gel des pierres ou des briques saturées en eau.*

## 5.5.2 RÉALISATION CONTRE-MUR SOUS FORME DE CONTREFORTS DEVANT UN MUR EXISTANT

En avant d'un mur de soutènement il est possible de construire des contreforts pour assurer la stabilité d'un mur de soutènement en maçonnerie existant. Ces contreforts peuvent être exécutés en maçonnerie ou en béton armé, lequel peut être recouvert d'un parement de pierres attachées pour des raisons d'aspect.

Les contreforts devant s'appuyer sur des fondations, il faut donc terrasser au pied du mur, ce qui impose un travail par plots successifs.

## 5.5.3 RÉALISATION CONTRE-MUR CONTINU DEVANT UN MUR EXISTANT

Pour stabiliser un mur de soutènement, il peut être fait appel à des tirants ancrés dans le sol, voire à des clous. La tête d'ancrage de chaque tirant s'appuie sur un gril de poutres en béton armé coulé en place devant le mur gril, qui répartit les efforts sur la surface du mur (un voile de béton armé coulé en place ou projeté peut assurer le même rôle). Le gril ou le voile est lié à la maçonnerie au moyen de broches ou d'épingles.

## 5.6.1 DOMAINE D'APPLICATION

En cas de tassement d'un ou de plusieurs appuis (piles ou culées), la courbe des pressions se déplace et **la voûte ou les voûtes concernées subissent une décompression et des déformations** (de tels désordres peuvent aussi concerner les voûtes adjacentes à une ou plusieurs voûtes détruites par faits de guerre ou par affouillement ; en effet, il y a décompression s'il y a un déplacement ou une rotation des piles. La reconstruction de la ou des voûtes ne permet pas de recomprimer les travées adjacentes).

Dans de tels cas, il faut commencer par faire cesser les causes du tassement (par exemple, l'arrêt d'un pompage dans une nappe phréatique), puis étudier une solution de réparation, voire de démolition reconstruction en commençant par réparer les fondations et les appuis pour terminer par la réparation ou la reconstruction de la ou des voûte(s).

**Parmi les solutions de réparation, il faut signaler le repositionnement de la courbe des pressions par un vérinage.** Il s'agit **d'une solution exceptionnelle, coûteuse et très délicate de mise en œuvre pour les voûtes en maçonnerie,** alors que cette technique est très classique pour décintrer des arcs en béton armé, d'autant qu'elle permet, en plus, de compenser les effets du retrait et du fluage du béton.

**> Par exemple :**

Freyssinet a expérimenté pour la première fois, en 1907, le décintrement au moyen de vérins d'une arche lors de la construction du pont de Praireal sur la Besbre. C'est aussi un vérinage qui a permis à Freyssinet, en 1911, de sauver le pont en béton armé de Veurdre sur l'Allier, dont l'articulation de clé s'abaissait dangereusement (ce vérinage fût suivi d'un blocage de l'articulation pour stabiliser les effets des déformations différées, phénomène mal connu à cette époque). Cette technique fut également utilisée pour le décintrement de l'arc en béton non armé, de 96,25 m de portée, du pont de Villeneuve-sur-Lot (1914-1919).

A noter, en 1945, un décintrement avec l'aide d'un mortier à base de ciment expansif mis en œuvre lors de la construction du pont de Laroche sur la ligne de chemin de fer Paris-Dijon.

## 5.6.2 DEUX EXEMPLES DE RÉGLAGE DE LA POUSSÉE DE VOÛTES

**> En France, il est possible de citer deux cas de réglage de la poussée de voûtes de ponts présentant des désordres :**

### 1. Premier cas :

**Deux arches du pont de Tomblaine en Meurthe et Moselle** ont été vérinées pour régler leur poussée en 1979[19]. Cet ouvrage en maçonnerie, construit en 1842, comportait 5 arches de 12,70 m d'ouverture. Côté rive gauche, les trois arches, détruites en 1944 par faits de

[19] *Informations extraites de la synthèse rédigée par la Division des Ouvrages d'Art du CETE de l'Est le 1er juin 1981.*

guerre, furent reconstruites en 1947 en **béton** avec des bandeaux en pierres de taille. Suite aux crues de la Moselle de 1947, deux autres voûtes en béton furent ajoutées, toujours côté rive gauche.

**Après l'été très chaud de 1976,** des fissures filiformes furent repérées au cours d'une inspection pendant le mois de décembre. Ces fissures se sont rapidement ouvertes, puisque des ouvertures respectives de 3 et 4 mm ont été constatées en octobre 1978. Une expertise a donc été entreprise pour déterminer l'importance des désordres et leurs causes.

**Désordres principaux :** les deux premières travées RG présentaient des fissures verticales et obliques au niveau des reins de 2 mm d'ouverture maximale et une fissure à l'intrados en clé de voûte d'une ouverture maximale de 4 mm (des fissures transversales de moindre importance avaient aussi été notées dans les voûtes des travées 4 et 5).

**Causes probables :** aucun tassement des appuis n'ayant été constaté et les mesures montrant une forte sensibilité des voûtes aux variations thermiques, il est probable qu'un glissement de la nouvelle culée RG sous la poussée de voûtes, lors de l'été 1976, ait provoqué une décompression de la première voûte, laquelle a entraîné la seconde.

**Réparations effectuées :** les voûtes n'ont pas été mises sur des cintres provisoires. **Quatre niches ont été réalisées à l'intrados des deux voûtes rive gauche au niveau de la clé** (cette solution a permis de ne pas avoir à toucher au remplissage), chaque niche permettant de loger un vérin de blocage provisoire et un vérin de blocage définitif. Les niches ont été réalisées symétriquement et l'une après l'autre. Dès qu'une des niches était terminée, le vérin de blocage provisoire était mis en pression pour éviter de réduire la section résistante de la voûte. Après la réalisation des quatre niches, les vérins définitifs (bloc-vérins) ont été mis en pression et les vérins provisoires démontés, ce qui peut permettre un nouveau réglage en cas de besoin.

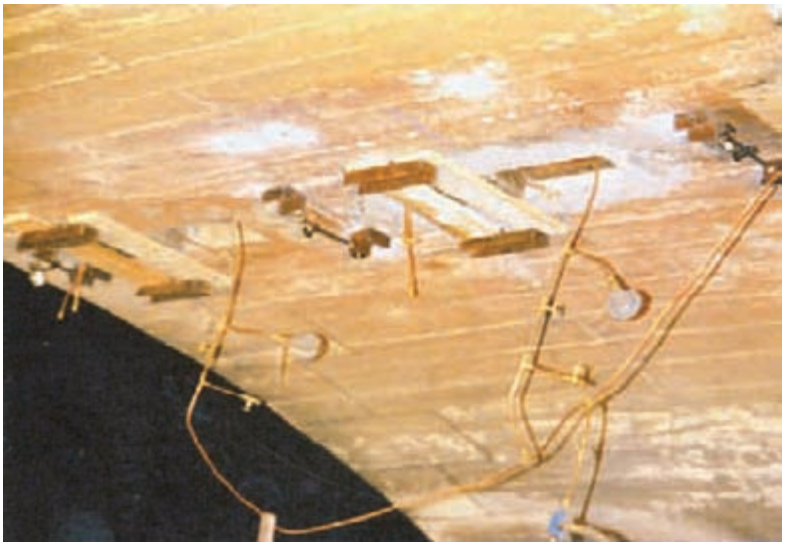


***Photo n° 78 : vérinage d'une des voûtes du pont de Tomblaine*** *(crédit photo Division des Ouvrages d'Art du CETE de l'Est)*

***Photo n° 79 : vérin provisoire à gauche et bloc vérin définitif à droite*** *(crédit photo Division des Ouvrages d'Art du CETE de l'Est)*

## 2. Deuxième cas :

**Deux arches du pont de Villeneuve Loubet dans les Alpes-Maritimes** ont été vérinées lors des travaux de réparation et d'élargissement de cet ouvrage entre 1999 et 2000 (se reporter aux deux articles cités en référence). La haute qualité des pierres de taille et des moellons d'appareil, avec une contrainte de rupture sur carotte de l'ordre de 130 MPa, a été un des facteurs qui ont permis de retenir cette solution.

***Photo n° 80 : les déformations du pont de Villeneuve-Loubet avant travaux*** *(crédit photo CG 06)*

# 5.6.3 RÉGLAGE DE LA POUSSÉE DES VOÛTES DU PONT DE VILLENEUVE-LOUBET - CONSTATATIONS ET ENSEIGNEMENTS

## 5.6.3.1 Description rapide de l'opération

Le lecteur est invité à se reporter aux deux communications susvisées sur cette opération qui a nécessité des études préalables longues et la participation d'une équipe pluridisciplinaire d'ingénieurs expérimentés pour déterminer quantitativement les causes des désordres et mettre au point le projet de réparation, ainsi que des solutions variantes. La réalisation des travaux n'a pas non plus été facile et il a fallu adapter les procédures d'exécution pour tenir compte du comportement de la maçonnerie…

La réalisation de l'opération a imposé le décaissement complet des voûtes et le démontage des tympans ainsi que la mise en place d'un cintre de sécurité sous la voûte et de butons métalliques pour empêcher tout déplacement des piles adjacentes. De plus, une instrumentation lourde a été mise en place pour mesurer les déformations pendant et après le réglage de la poussée (cordes vibrantes), mais aussi les effets des variations thermiques, afin de procéder aux corrections des mesures brutes.

Le calcul à rupture ne permettant pas de calculer la valeur probable de la poussée de la voûte au moment de sa construction, ni le couple forces déplacements lors du vérinage, deux modèles élastiques, l'un de l'ensemble de l'ouvrage et de ses appuis (piles) et l'autre simple de la voûte concernée, ont été utilisés. Les mesures effectuées lors du vérinage ont montré que le modèle le plus simple donnait des déformations très proches de celles mesurées (l'utilisation des calculs aux éléments finis visés dans **l'annexe 2 [FABEM 6.4]** pourrait permettre une meilleure approche du fonctionnement «pseudo élastique» des voûtes).

Les emplacements de vérinage ont été créés au carottier à l'extrados des voûtes et dans la section de clé dans la maçonnerie en moellons d'appareil (corps de voûte). Les intervalles entre les plaques métalliques placées de part et d'autre des vérins et la maçonnerie ont été comblés avec un mortier de calage pour assurer une répartition correcte, sur la maçonnerie, des efforts développés par les vérins plats.

Des vérins ont dus être rajoutés dans les bandeaux pour que le recompression concerne également les bandeaux (incidence des différences de rigidité entre le corps de voûte et les bandeaux).

**Le premier réglage de la poussée** de la première des deux voûtes a montré que les effets du vérinage diminuaient rapidement par adaptation de la maçonnerie (fermeture progressive des fissures ouvertes). Il a alors été décidé de recommencer l'opération jusqu'à ce que les déformations se stabilisent. **Cinq jours ont été nécessaires pour atteindre la stabilisation de la poussée !**

Pour empêcher l'ouverture de la voûte de se refermer, des cales biaises étaient introduites entre les plaques métalliques de répartition situées de part et d'autre les vérins.

## Domaine d'application - Limites d'emploi



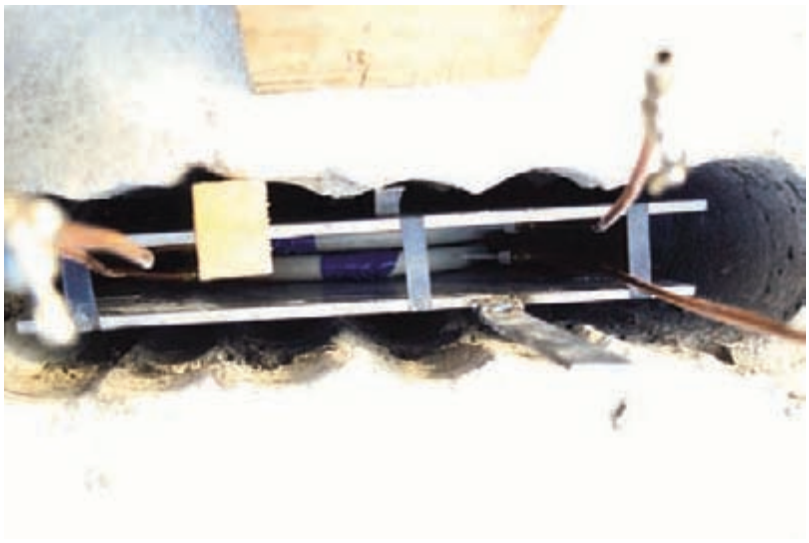


***Photo n° 81 : dispositif de vérinage*** *(crédit photo P. Vion)*

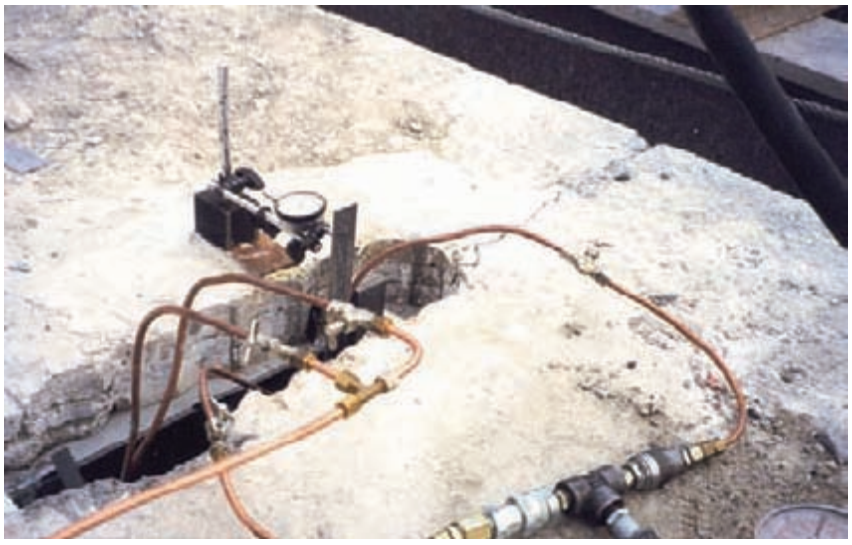


***Photo n° 82 : vérinage en cours avec ouverture de la voûte*** *(crédit photo P. Vion)*

**Une fois les poussées réglées, les ouvertures aux clés, les niches des vérins, les vérins, les joints ouverts ont été injectées** pour rendre le monolithisme des voûtes. Ensuite, les tympans ont été reconstruits et, après mise en place d'un remblai léger, une dalle en béton léger a été réalisée afin d'augmenter la largeur utile de la voie et des trottoirs (l'utilisation de matériaux légers a permis de ne pas modifier les descentes de charges sur les fondations et, ainsi, d'éviter tout tassement d'appui supplémentaire).

## 5.6.3.2 Constatations et enseignements

**> Des constations effectuées sur le chantier et lors de l'interprétation des mesures, il est possible de tirer les enseignements suivants :**

- les pierres de la maçonnerie doivent être en bon état et résistantes ;
- la mise en place **d'agrafes** entre les pierres ou, mieux encore, **de tirants d'enserrement** est indispensable pour équilibrer les poussées transversales causées par les efforts concentrés au droit des vérins (l'épinglage prévu au **marché** n'avait pas été mis en place). Un risque d'instabilité de la voûte est à redouter (se reporter à la photo ci-après) ;
- dans le cas où le corps de voûte comporte plusieurs épaisseurs de pierres, le positionnement des niches des vérins n'est pas évident pour être sûr d'obtenir l'ouverture du joint juste à la clé ;
- le bandeau, plus rigide que la maçonnerie du corps de voûte (moins de joints), doit aussi être équipé de vérins ;
- le réglage ne devient stable qu'après plusieurs vérinages échelonnés sur environ une semaine ;
- l'ouverture de la voûte, pour obtenir la poussée nécessaire, avait été estimée à 5 mm. Au premier vérinage, l'ouverture a atteint 4 mm et, après les vérinages successifs échelonnés dans le temps, l'ouverture finale a été de 7,5 mm ;
- les effets thermiques perturbent les mesures, en particulier sur la voûte (il faut effectuer les vérinages et les mesures tôt le matin, travailler à l'abri du soleil, si c'est possible, etc.) et aussi sur les butons (éviter les butons métalliques ou les mettre à l'abri de l'ensoleillement direct ou les arroser…).

***Photo n° 83 : ouverture du joint accompagnée d'un déplacement transversal en l'absence d'épingles ou de tirants d'enserrement***
*(crédit photo P. Vion)*

## 5.6.3.3 Solution variante non encore expérimentée

Cette solution est inspirée du vérinage des arcs en béton armé et du réglage de la poussée des voûtes du pont de Tomblaine.

**> Les croquis qui suivent montrent une solution variante de réglage de la poussé[20] présentant moins d'aléas mais nécessitant une mise sur cintre complète pour pouvoir :**

- d'une part, construire après une démolition partielle de la voûte, deux longrines en béton armé dans la zone de clé permettant de réaliser un vérinage plus pur ;
- d'autre part, procéder à un sciage des pierres de la clé de voûte des bandeaux pour obtenir une ouverture de la voûte nette et rectiligne, donc facile à injecter.

Dans cette solution, les longrines en béton armé sont liées aux pierres du corps de voûte et des bandeaux par des broches et des épingles, ainsi que par les tirants d'enserrement.

**Sur les figures ci-après,** un seul vérin plat a été représenté. Dans un projet réel, il faut mettre plusieurs vérins superposés pour obtenir l'ouverture de la voûte calculée et qui correspond à la poussée à mettre en œuvre (aux incertitudes près du modèle de calcul et des calculs des structures en maçonnerie[21]). En effet, chaque vérin a une course utile pouvant varier entre 15 et 50 mm suivant le modèle.

Des vérins hydrauliques classiques extra-plats pourraient aussi être utilisés, mais, dans ce cas, ils doivent être récupérés avant de procéder à l'injection de calage : leur récupération peut s'avérer difficile.

Le dispositif de vérinage est positionné pour que la courbe des pressions dans la voûte seule, très excentrée vers le haut à cause de la décompression, se recentre et passe à la limite supérieure du noyau central de la section, soit à h/6 (h représente l'épaisseur de la voûte à la clé).

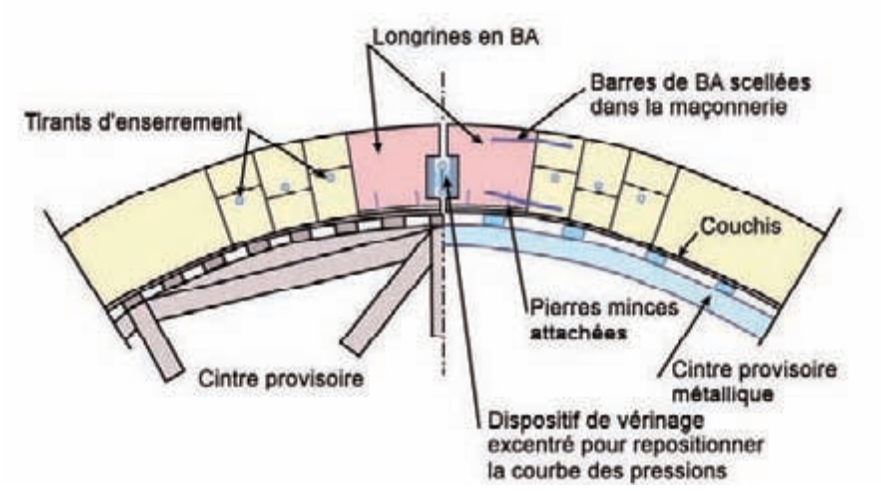



***Figure n° 71 : schéma de principe dans le sens longitudinal***

[20] *Des aménagements de la solution sont, bien entendu, envisageables.*

[21] *Se reporter à l'annexe n°2 [FABEM 6.4] qui traite du mode de fonctionnement des voûtes en maçonnerie et des méthodes de calcul.*

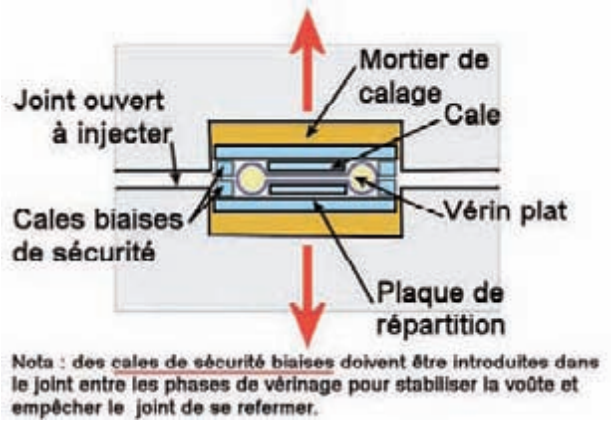

Mortier de calage
Joint ouvert à injecter
Cale
Cales biaises de sécurité
Vérin plat
Plaque de répartition
Nota : des cales de sécurité biaises doivent être introduites dans le joint entre les phases de vérinage pour stabiliser la voûte et empêcher le joint de se refermer.

*Figure n° 72 : détail du dispositif de vérinage*

Il faut prévoir un anneau sur chaque cale biaise pour pouvoir la suspendre, la manipuler, éviter qu'elle ne tombe dans la niche… Les cales de sécurité biaises (en forme de coin) peuvent être remplacées par des vérins provisoire de calage qui sont à récupérer lors de la mise en pression des vérins de calage définitifs.

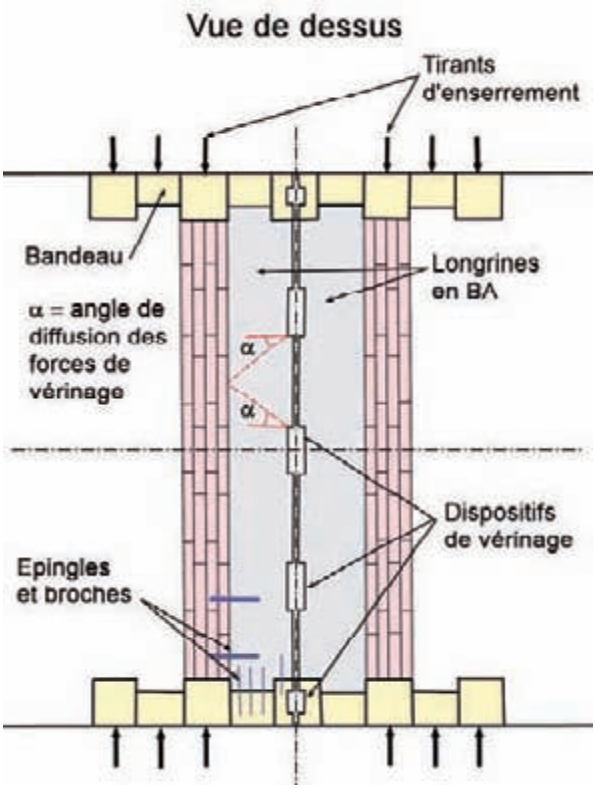



*Figure n° 73 : schéma de principe en plan*

# Domaine d'application - Limites d'emploi



**Les deux longrines en béton armé doivent être coulées à joint conjugués,** ce qui impose de commencer par bétonner une des longrines. Après durcissement de son béton et décoffrage, il faut mettre en place, par exemple, une feuille de polyane ou un produit empêchant le collage du béton frais sur le béton durci, avant de bétonner la seconde longrine. Pendant le vérinage, la feuille de polyane ou le produit sont à enlever pour permettre **l'injection de clavage ultérieure.**

Pour des raisons d'aspect, l'intrados de la voûte peut être habillé par des pierres minces attachées (consulter **la norme NF B 10-601 et le DTU 52.1**). Il faut prévoir des **joints souples** entre les pierres attachées pour éviter leur mise en compression.

**Si un réglage de la poussée** est nécessaire après remblaiement et mise en place des superstructures, voire ultérieurement, il faut que les niches à vérins débouchent sous l'intrados de la voûte, comme au pont de Tomblaine. Dans ce cas, les dimensions de la niche doivent permettre de mettre en place un nouveau vérin pour procéder au vérinage ultérieur, puisque le vérin du premier réglage est injecté à la fin du réglage.

Une telle opération nécessite la mise en place d'appareils de mesures pour suivre les déformations, les contraintes, les incidences des effets thermiques… (se reporter aux deux articles susvisés qui précisent les principales mesures effectuées et les résultats qui en ont été tirés).

**La plus grande parties des opérations** nécessaires à la réalisation des différentes réparations et renforcements structuraux susvisés relève **du domaine des ouvrages neufs** (mise en place d'étais, de coffrages, de ferraillage, de béton…). Cependant, **certaines des opérations peuvent concerner la réparation de la maçonnerie** (décaissement, rescindement de l'intrados, remplacement de pierres et de briques…).

Pour les opérations relevant des ouvrages neufs, il appartient au **marché** de fixer les exigences à satisfaire en s'appuyant, par exemple, pour les parties en béton, sur le **fascicule 65 du CCTG, le guide FABEM 5…**

Pour les autres opérations qui concernent la maçonnerie, il suffit de s'appuyer sur les guides «Maçonnerie» qui détaillent toutes les opérations de réparation de la maçonnerie.

La réalisation d'une structures additionnelle au contact d'un ouvrage existant nécessite de prendre des précautions pour éviter de le ruiner, provoquant ainsi des désordres collatéraux. Il est donc nécessaire de mettre en place des dispositifs de mesures (parfois un dispositif d'alerte automatique) permettant de surveiller le comportement de l'ouvrage existant durant toute la durée du chantier, voire ultérieurement.

# 5.8 Réception des travaux (pour mémoire)



**Se reporter au paragraphe 5.11 du guide FABEM 6.1.**

# 6

# Élargissement des ponts-voûtes et augmentation de leur débouché


6.1 Considérations sur les spécificités de l'élargissement d'un pont en maçonnerie ou de l'augmentation de son débouché

6.2 Études préalables

6.3 Principales solutions d'élargissement des ponts en maçonnerie

6.4 Principales solutions d'augmentation du débouché des ponts en maçonnerie

6.5 Choix de matériaux

6.6 Réception des travaux (pour mémoire)

## 6.1.1 DIFFICULTÉS POSÉES PAR LA RÉALISATION DE TELS TRAVAUX

***AVERTISSEMENT***

***L'élargissement d'un pont en maçonnerie ou l'augmentation de son débouché est quasiment assimilable à la construction d'un pont neuf.*** *En effet, il nécessite d'importantes* ***études préliminaires*** *avant d'aboutir au* ***projet de l'opération,*** *puis à la* ***réalisation des travaux.*** *De plus, ces travaux font appel à quasiment* ***toutes les disciplines du génie civil,*** *depuis la maçonnerie, le béton… jusqu'à l'étanchéité, les revêtements de chaussée…*

*Il est donc possible de dire que de telles opérations, même si elles utilisent* ***certaines techniques de réparation,*** *telles que le remplacement de pierres, le rejointoiement… relèvent surtout du* ***domaine des ouvrages neufs.***

***Le présent guide*** *ne peut donc rentrer* ***dans tous les détails de telles opérations,*** *d'autant que, pour un pont en maçonnerie donné, de multiples solutions sont envisageables.*

***Cette partie du guide FABEM 6.3*** *est donc consacrée à la description des différentes solutions d'élargissement des ponts en maçonnerie et d'augmentation de leur débouché, en s'appuyant sur les documents de référence disponibles. Cependant, le* ***choix des matériaux*** *du remplissage et du corps de chaussée, ainsi que les* ***contrôles*** *et les* ***essais*** *à effectuer sur ces matériaux et lors de leur mise en œuvre, ont été, dans la mesure du possible, détaillés.*

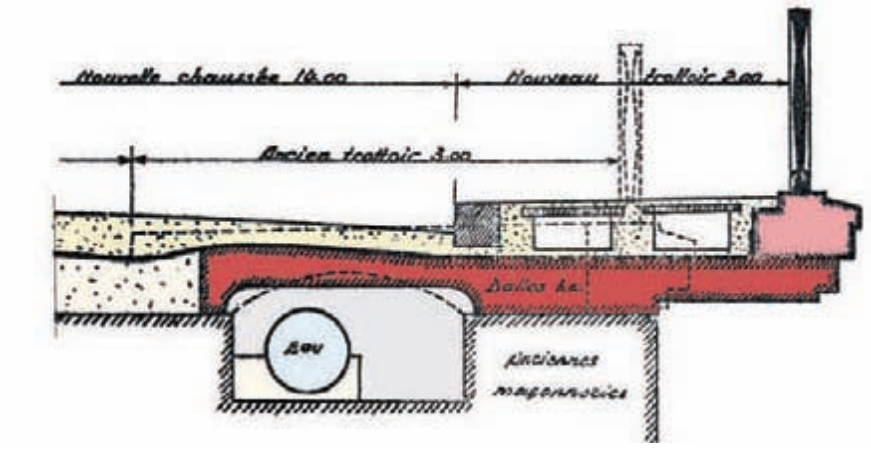



***Figure n° 74 : l'élargissement du pont des Invalides*** *(extrait du cours de ponts de l'ENTPE 1959 par G. Grattesat)*

La figure ci-devant relative à l'élargissement du pont des Invalides à Paris entre 1954 et 1956 montre que la préoccupation d'élargir les ponts en maçonnerie n'est pas nouvelle[22].

[22] *Les élargissements en béton armé de cet ouvrage, âgés actuellement de 55 ans, présentent des désordres importants causé par la corrosion de leurs armatures de béton armé (consulter le site du LERM).*

## 6.1.2 LE DOCUMENT DE RÉFÉRENCE

**Le document de référence que le lecteur doit obligatoirement consulter est le guide technique du SETRA de décembre 2001, qui traite de l'élargissement des ponts en maçonnerie par le dessus.**

**> Ce guide technique du SETRA de décembre 2001, après un rappel sur l'évolution des ouvrages au cours des âges, sur les matériaux utilisés au cours des âges, sur la conception des structures et de leurs équipements, sur le fonctionnement d'une voûte en maçonnerie et sur la description de certains élargissements plus ou moins anciens, décrit dans le détail :**

- comment définir les besoins, les données et les contraintes dans le **programme du maître d'ouvrage ;**
- **les différentes étapes d'un projet d'élargissement :** diagnostic de l'ouvrage, évaluation de sa capacité portante [voûte, appuis et fondations], données à fixer et contraintes à respecter, études techniques et architecturales à effectuer, consistance des pièces écrites, déroulement de la consultation des entreprises, réalisation et contrôle des travaux… ;
- **les différents types d'élargissements, avec leurs avantages, leurs inconvénients et des conseils [domaine d'emploi, dispositions constructives à respecter, mode de réalisation…] ;**
- **la réalisation et le contrôle des travaux** avec ou sans maintien de la circulation.

**> Le guide comporte également :**

- **un exemple de calcul** d'un pont élargi par une dalle générale (stabilité de la voûte et résistance de la dalle) ;
- **17 fiches techniques d'élargissements** réalisés entre 1950 et 2000, sachant que la majeure partie des élargissements concerne les deux dernières décennies du XX$^{e}$ siècle.

## 6.1.3 LES PARTICULARITÉS DE LA PARTIE DU PRÉSENT GUIDE CONSACRÉE AUX ÉLARGISSEMENTS ET D'AUGMENTATION DE LEUR DÉBOUCHÉ.

**Cette partie du guide FABEM 6.3** tente de ne pas paraphraser le **guide du SETRA sur les élargissements,** très complet, auquel il est impératif de se reporter, mais elle rappelle et insiste sur les points essentiels qui conditionnent la réussite d'une telle opération d'élargissement.

**Elle comporte cependant quelques compléments et conseils, puisqu'elle traite des solutions d'augmentation du débouché d'un pont en maçonnerie qui ne figurent pas dans le guide du SETRA.**

## 6.2.1 GÉNÉRALITÉS

**L'étude préalable** est une des **étapes fondamentales d'un projet d'élargissement ou d'augmentation du débouché.** Bien menée, elle conduit à une solution aux coûts et délais bien maîtrisés. Toute impasse dans le processus décrit le paragraphe 3.3 du guide FABEM 6.1 consacré aux **études et investigations** conduit, le plus souvent, à des arrêts de chantier, à des surcoûts, quand ce n'est pas à **l'effondrement de l'ouvrage** lors des travaux. De tels effondrements sont liés, le plus souvent, à **l'absence d'investigations sur les fondations.**

Le présent paragraphe complète **le paragraphe 3.3 du guide FABEM 6.1** consacré aux études et investigations.

***Photo n° 84 : effondrement du pont du Réart causé par des travaux sur les fondations*** *(crédit photo D. Poineau)*

***NOTA :*** *l'effondrement d'un pont en maçonnerie en cours de travaux aurait pu être illustré par des photographies de cas plus récents mais, ceux-ci sont encore en cours d'instruction.*

**> L'étude préliminaire est basée sur la commande du maître d'ouvrage[23] qui définit les besoins à satisfaire tels que :**

- recalibrage complet d'une route aux caractéristiques géométriques insuffisantes (cela peut aussi concerner la portance) et qui franchit un passage inférieur en maçonnerie également de largeur insuffisante. Cette opération peut être lancée dans le cadre d'une amélioration du trafic normal ou dans le cadre de l'aménagement d'un itinéraire de convois exceptionnel… ;

[23] *Se reporter à la* ***recommandation T1-94 du GPEMT/TMO du 17 mars 1994*** *relative à la démarche exigentielle dans le domaine des ouvrages du génie civil.*

- recalibrage local d'une route au droit d'un passage inférieur en maçonnerie :
  - de largeur insuffisante pour le passage des véhicules (rase campagne) et/ou des piétons (agglomération),
  - situé au milieu d'un tracé routier chahuté pouvant être dangereux, avec courbe et contre-courbe serrées rendant le croisement des poids-lourds délicat…

L'étude préliminaire peut aussi concerner **l'élargissement par le dessous** pour améliorer l'écoulement des eaux lors des crues ou pour permettre le recalibrage de la chaussée franchie.

**> L'étude préliminaire s'appuie :**

- **sur les données rassemblées dans le dossier de l'ouvrage et le programme du maître d'ouvrage :**
  - ces données doivent être complétées par les investigations sur le site si les informations manquent ou sont contradictoires ;
  - dans son chapitre 2 relatif à la démarche du projet, le guide du SETRA détaille les diverses données à rassembler et les diverse contraintes à fixer :
    - données naturelles (données hydrauliques, géotechniques, climatiques…),
    - données fonctionnelles (profil en travers, profil en long, réseaux existants et à prévoir, calendrier de l'opération…),
    - données liées à l'environnement (loi sur l'eau…),
    - données architecturales (monument historique, site classé…),
    - programme et calendrier prévisionnel de l'opération (délais à respecter…),
    - données et contraintes liées aux conditions de réalisation (maintien ou non du trafic, durées possibles et périodes possibles des interruptions de circulation, déviations existantes, nécessité d'un ouvrage provisoire pour le trafic [léger ou poids lourds] ou d'une passerelle provisoire pour les piétons…).
- **sur le diagnostic de l'ouvrage existant :**

***Photo n° 85 : pont dit de 100 mètres (ancien pont ferroviaire) avant son élargissement*** *(crédit photo DDE 52)*

- état de la structure (voûtes, appuis, murs fondations) à partir des inspections détaillées et des investigations in situ ou en laboratoire ;
- conditions d'écoulement des eaux en période de crues :
  - débouché linéaire, débouché superficiel et coefficient d'obstruction,
  - débit à la cote «Z» calculée par la formule de Manning-Strickler, ce qui permet d'évaluer, en fonction des débits de crue mesurés, le niveau des eaux correspondant,
- risques d'affouillement (fondations superficielles et terrains affouillables, fondations sur pieux en état précaire…) ;
- risques d'embâcles (atterrissements et branchages) qui ne sont pas pris en compte dans les calculs des débits de crues visés ci-dessus ;
- risques de laves torrentielles… ;
- force portante des voûtes et des fondations à partir des recalculs basés sur les plans, les inspections détaillées de la superstructure et des fondations et les diverses investigations effectuées…

***ATTENTION :*** *toute information recueillie dans le dossier de l'ouvrage et, en particulier, les plans doivent faire l'objet d'une vérification in situ (les plans certifiés conforme à l'exécution sont très rares). Le dossier est même souvent vide !*

**Il y a lieu de rappeler le processus en 7 étapes décrit dans le guide FABEM 1, qui s'applique aussi au cas de l'élargissement d'un pont en maçonnerie :**

1. la détection des dégradations ou du problème à résoudre ;
2. l'auscultation – le diagnostic – le pronostic ;
3. l'établissement du projet de réparation ;
4. la mise en sécurité de l'ouvrage ;
5. la réalisation des réparations et/ou du renforcement ;
6. les contrôles et vérifications des résultats ;
7. la surveillance après travaux.

**La deuxième étape,** qui porte sur **«l'auscultation - le diagnostic - le pronostic»,** est essentielle. Elle doit permettre d'identifier les éventuelles maladies ou insuffisances, d'en estimer l'importance et d'en identifier les causes. La qualité de ce diagnostic revêt une grande importance pour la réussite ou l'échec de la réparation, notamment sa durabilité.

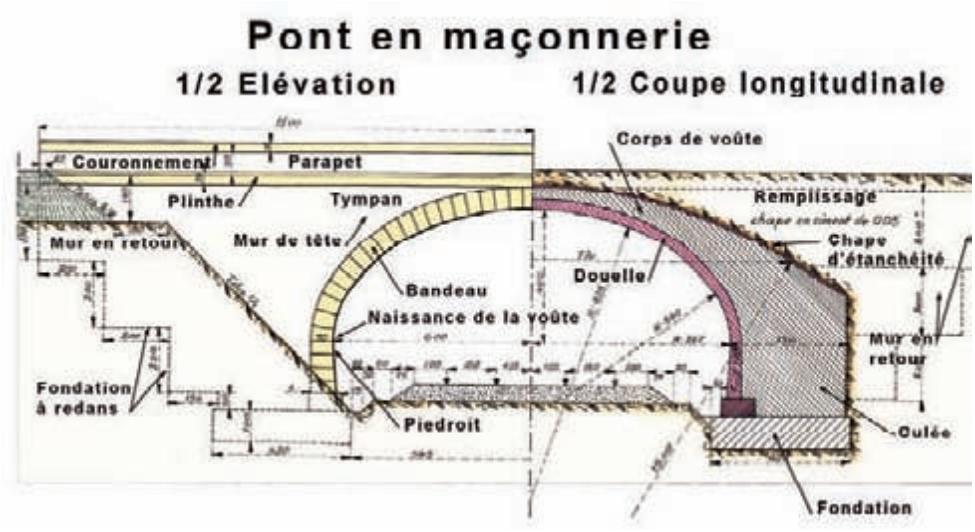



*Figure n° 75 : exemple de fondations à redans pouvant fragiliser les murs en retour*

Comme indiqué dans le **guide du SETRA,** cette phase d'investigation doit permettre de connaître la **géométrie de la structure existante.** Le guide **ne met pas suffisamment en garde** sur les surprises désagréables que les travaux peuvent révéler lorsque les investigations n'ont pas concerné toutes les parties de l'ouvrage. Il est possible de citer :

- une voûte paraissant à l'intrados monolithique, mais en fait constituée de deux voûtes d'épaisseurs différentes à cause d'un élargissement antérieur ;
- des murs en retour amont et aval n'ayant pas la même géométrie ou le même niveau de fondation ;
- un corps de voûte sectionné partiellement par la pose de câbles de télécommunication au moyen d'une trancheuse…

■ **sur l'étude architecturale effectuée à la demande du maître d'ouvrage et qui peut concerner :**

- un ouvrage classé monument historique ;
- un ouvrage situé dans le périmètre d'un bâtiment classé ;
- un ouvrage remarquable et visible situé dans une agglomération ou en rase campagne…

***NOTA :*** *Cette étude doit être menée en* ***étroite collaboration*** *avec le* ***bureau d'études*** *chargé du projet, qui est à même de juger de la faisabilité, du coût et de la durabilité des solutions proposées.* ***L'ingénieur et l'architecte*** *doivent constituer une* ***véritable équipe.***

**Une telle étude architecturale ne concerne pas, sauf exception, les petits ouvrages** de rase campagne, insignifiants, dissimulés par la végétation… ; un bureau d'études est, normalement, capable de trouver des solutions qui ne détonneront pas dans le paysage.

## 6.2.2 PRISES DE DÉCISION PENDANT ET À LA FIN DE L'ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

**> Pendant l'étude, il convient de faire au minimum un POINT D'ARRÊT à la fin de la seconde étape consacrée au diagnostic pronostic. En effet, cette étape peut remettre en cause les objectifs initiaux. Les trois cas qui suivent, non limitatifs, sont donnés à titre d'exemple :**

1. petit ou moyen ouvrage quelconque, souvent de rase campagne, dont les pierres sont très sensibles au gel et la maçonnerie très désorganisée…[24];

2. petit ou moyen ouvrage aux fondations pouvant être considérées comme fragiles et dont le débouché est insuffisant pour laisser passer les **nouvelles crues exceptionnelles** (incidences des modifications du caractéristiques du bassin versant dues au développement des surfaces imperméables liées à l'urbanisation, effets des modifications climatiques…), d'autant qu'un phénomène **«d'embâcle»,** causé par les atterrissements et les amoncellements de branchages (appelés aussi «encombrants de bois»), est à redouter… ;

3. **ouvrage ayant eu une histoire complexe,** comme le pont Wilson à Tours, qui connut :
   - pendant sa construction la chute d'une voûte et l'affaissement d'une pile ;
   - puis, deux ans après sa mise en service, en 1789, une débâcle entraînant la chute de 4 arches et nécessitant la reconstruction des piles et des arches et la construction de radiers, dont les travaux ont été effectués entre 1804 et 1806 et entre 1838 et 1840 avec, entre-temps, en 1835, des tassements de certaines piles ;
   - puis, le dynamitage d'une arche le 18 juin 1940 et celui de 3 arches le 22 juin 1944 ;
   - enfin pour terminer, l'effondrement des arches 1 à 6 le 9 avril 1978 lors d'une crue de la Loire !

***Photo n° 86 : état de l'intrados d'une voûte en pierres très sensibles au gel*** *(crédit photo LRPC)*

[24] *De tels ouvrages ont souvent été délaissés avec, pour corollaire, une méconnaissance de leur état.*



I Retour au sommaire I

***Photo n° 87 : accumulation de branches pouvant créer un phénomène d'embâcle*** *(extrait IQOA - crédit photo SETRA)*

**Dans le premier cas cité,** la solution de démolition-reconstruction est à étudier et chiffrer, car c'est vraisemblablement une bonne solution.

**Dans le second cas,** il faut commencer par procéder à l'étude du renforcement des fondations tout en recherchant des **solutions pour évacuer les eaux** en cas de **crue** doublée d'un **embâcle** : ce peut être un abaissement local des remblais d'accès rendant la voie submersible ou la construction d'ouvrages de décharge…

**Dans le troisième cas,** il faut s'attendre à des investigations extrêmement lourdes.

**Si les conclusions du diagnostic-pronostic ne débouchent pas sur une difficulté,** l'étude se poursuit par la recherche des **solutions d'élargissement ou d'augmentation du débouché possibles.** Elles doivent, bien entendu, être adaptées aux spécificités de l'ouvrage à traiter. Les principales solutions avec leurs avantages et inconvénients sont récapitulées dans l'article 6.3 ci-dessous.

À la fin de cette **étude préliminaire,** il appartient au **maître d'ouvrage** de prendre la décision de lancer la suite des études (POA, DCE…), voire d'autoriser des investigations complémentaires, si besoin est.

Cette partie du document concerne les différentes solutions d'élargissement des ponts en maçonnerie dans le but d'augmenter la largeur des chaussées et/ou des trottoirs.

## 6.3.1 GÉNÉRALITÉS

**> Rappel, le guide SETRA distingue 4 types d'élargissements :**

1. les élargissements par des structures s'appuyant directement sur l'ouvrage existant ;
2. les élargissements par des structures s'appuyant sur les appuis de l'ouvrage existant ;
3. les élargissements par des ouvrages accolés à l'ouvrage existant ;
4. les autres types d'élargissements.

Ces divers types sont récapitulés dans les tableaux et paragraphes qui suivent avec, sous une forme très synthétique, leurs avantages et inconvénients et, si nécessaire, des **recommandations et conseils** et les renvois **au guide du SETRA** qui s'imposent.

***Photo n° 88 : élargissement du pont de Gignac au niveau des travées de rive*** *(crédit photo Parexlanko)*

**L'attention doit être attirée sur le fait qu'un élargissement ne se résume pas à une simple coupe transversale. Il faut tenir compte, d'une part, de la géométrie de l'ouvrage dans son ensemble,** en particulier à ses extrémités en présence d'élargissements des voûtes (par exemple : pendentifs du pont Wilson à Tours) ou de la plateforme (par exemple : lorsque les murs en retour ne sont pas situés dans le prolongement des murs de tête) et, d'autre part, de la **zone d'influence** aux abouts (la zone d'influence s'étend sur une partie des remblais d'accès, comme l'indique en page 44 le **guide du SETRA**).

**> En outre, le projet de l'élargissement doit impérativement tenir compte de l'obligation de mettre en place une étanchéité qui, suivant le cas, peut prendre les trois positions suivantes :**

1. basse, c'est-à-dire sur l'extrados de la voûte et sur la face intérieure des murs ;
2. intermédiaire, c'est-à-dire entre le matériau de remplissage et la chaussée;
3. haute, directement sous la couche de roulement.

***NOTA :*** *l'étanchement et le drainage d'un pont en maçonnerie sont traités dans le* ***guide FABEM 6.2*** *qui s'appuie sur le* ***guide technique du SETRA de mai 1992*** *relatif à la protection contre les eaux des ponts en maçonnerie. Ce guide de 1992 complète le* ***guide du SETRA de 2001*** *sur les élargissements qui donne aussi des dispositions d'étanchement.*

## 6.3.2 ÉLARGISSEMENTS PAR DES STRUCTURES S'APPUYANT DIRECTEMENT SUR L'OUVRAGE EXISTANT

**> Trois solutions classiques peuvent être envisagées :**

1) la dalle générale ;

2) l'encorbellement avec contrepoids ;

3) le réseau de poutres transversales.

### 6.3.2.1 Cas de la dalle générale

#### 6.3.2.1.1 Généralités

**> La dalle générale (pages 58 à 78 du guide) peut s'appuyer :**

1) uniquement sur le remblai ;

2) sur le remblai et les tympans **(solution déconseillée par le guide) ;**

3) uniquement sur les tympans.

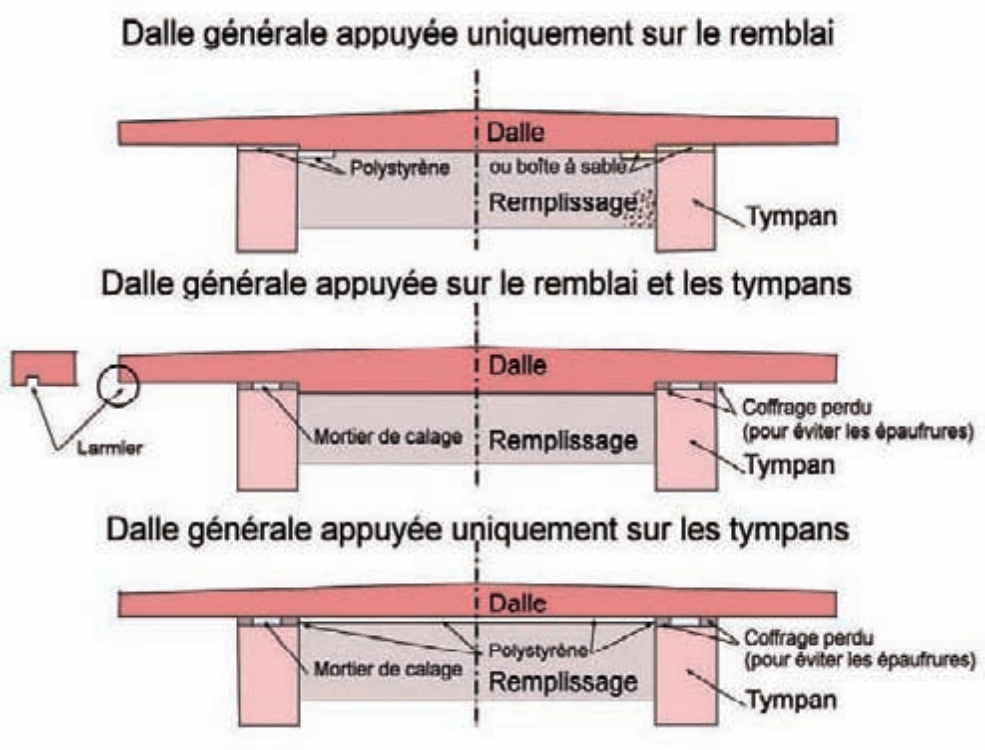



***Figure n° 76 : trois types d'élargissements par dalle générale***

**> Ces trois solutions :**

- **facilitent le drainage des eaux** et assurent une bonne étanchéité, sauf aux extrémités où des tranchées drainantes sont nécessaires ;
- imposent **de longues coupures totales de circulation** et le démontage des parapets ;
- nécessitent, si le remblai est de mauvaise qualité, la purge partielle ou totale du remplissage ;
- augmentent les descentes de charges sur la structure, sauf recours à des remblais allégés et à un béton léger pour la dalle ;
- modifient plus ou moins le fonctionnement de la structure ;
- nécessitent des joints de dilatation aux extrémités de la dalle si le pont est de grande longueur et des dalles de transition si les remblais d'accès peuvent tasser. Les solutions visées en page 9 du guide SETRA sur les dalles de transition des ponts-routes peuvent aussi être envisagées ;
- imposent de déplacer les réseaux dans les trottoirs et/ou de les suspendre sous les encorbellements[25] car, placés sous la dalle, ils deviennent inaccessibles ;

[25] *Il est déconseillé, **sauf dispositions techniques particulières,** de faire passer certains types de réseaux dans le matériau de remplissage des ponts en maçonnerie à cause, d'une part, des travaux d'entretien des permissionnaires de voirie, qui peuvent causer des dommages et, d'autre part, des désordres que pourrait causer un incident sur le réseau tel, qu'une fuite d'eau (cas des canalisations EP et EU).*

- protègent le pont et facilitent les travaux d'entretien de la couche de roulement ;
- les solutions d'élargissement des types (2) et (3) sont difficilement compatibles avec les élargissements existants aux extrémités de certains ouvrages.

**Pour les trois solutions,** les paragraphes qui suivent détaillent les détails constructifs à respecter et complètent, si nécessaire, le **guide du SETRA.**

***Photo n° 89 : pont surbaissé de Favernay qui pourrait être compatible (après réparations) avec une dalle générale appuyée sur le remplissage*** *(crédit photo DDE 70)*

***Photo n° 90 : pont très étroit à arches de faible portée qui pourrait être compatible avec une dalle générale appuyée sur les tympans, voire sur les tympans et le remblai*** *(crédit photo D. Poineau)*

***Photo n° 91 : pont de dit de 100 mètres après élargissement par une dalle générale appuyée sur le remplissage***
*(crédit photo DDE 52)*

***ATTENTION :*** *les figures du présent texte ont été volontairement schématisées. La plupart des détails technologiques (superposition des différentes couches de remplissage, raccordement des étanchéités, conception du drainage...) n'y figurent pas. Il faut se reporter aux documents visés en référence.*

### 6.3.2.1.2 Incidences sur la conception des élargissements par dalle générale de la norme sur les travaux de dallage

**> ATTENTION, la norme NF P 11-213-1 (relative aux travaux de dallage) ne s'applique normalement pas aux dallages préfabriqués, précontraints, de types routiers... mais elle développe les points principaux suivants qui peuvent être utiles lors de l'étude et de la réalisation de la dalle d'élargissement d'un pont-routier en complément des indications fournies par le guide du SETRA (par exemple, les effets du retrait différentiel) :**

- les matériaux utilisés ;
- les actions appliquées (les charges réparties, les charges concentrées fixes ou mobiles, le retrait, les gradients thermiques...) ;
- les caractéristiques du sol, les propriétés des matériaux utilisables en couche de forme, les essais à effectuer et les données géotechniques à obtenir ;

- la réalisation des différents types de joints ;
- le calcul d'un dallage, qui se trouve en partie dans le texte de la norme et pour le reste dans une annexe normative (déformations sous les charges, incidences des variations thermiques, effets du retrait différentiel, incidences des gradients thermiques, déformations dans les angles…) ;
- les conditions de réalisation d'un dallage et les tolérances d'exécution.

**Dans son annexe B, cette norme** propose un tableau définissant les actions et les exigences spécifiques pour les dallages. **Ce tableau peut être utilisé,** avec des adaptations, dans le **marché** d'un élargissement de type dalle générale.

**Dans son annexe C, cette norme** donne les méthodes permettant d'évaluer les déformations et les sollicitations dans un dallage. Là encore, ces méthodes peuvent être utilisées dans le cas d'un élargissement de type dalle générale appuyée sur remplissage **pour recouper le modèle de calcul** proposé dans **le guide du SETRA.** En particulier, sont traités les effets des retraits différentiels, **des gradients,** des déformations dans les angles…

***Nota important : la valeur de 5°C*** *prise en compte dans* ***le guide du SETRA*** *(page 65) pour le gradient thermique est fournie sans aucune autre explication.*

*Les valeurs données par* ***la norme pour un dallage non revêtu et non abrité du soleil*** *(c'est le cas de la dalle d'élargissement avant réalisation de la chaussée) donne* ***un gradient qui peut atteindre 17,5° C*** *pour une dalle de 25 cm d'épaisseur !*

*De plus, un examen rapide des relevés de températures effectués dans le tablier, en service, du pont de Champigny-sur-Yonne par le LCPC dans les années 70 montre* ***un gradient de près de 9°C !***

***> Il faut donc fixer dans le marché :***

- ***un gradient en phase de travaux*** *ou imposer la protection contre le soleil de la dalle ;*
- ***un autre gradient pour l'ouvrage en service,*** *tenant compte de la présence de la couche de roulement, qui présente une certaine inertie thermique, mais qui absorbe la chaleur à cause de sa couleur.*

### 6.3.2.1.3 Cas de la dalle générale simplement appuyée sur le remplissage

**> Ce type d'élargissement est décrit dans les pages 60 à 67 du guide du SETRA, qui indique que :**

- c'est la solution à privilégier (mode de fonctionnement de la voûte conservé et modèle de calcul maîtrisé) ;
- la largeur totale est limitée à environ deux fois la distance entre les tympans ;

- les tympans non chargés en tête se trouvent davantage sollicités. Ce point peut être corrigé en déplaçant le point d'application des charges apportées par la dalle au moyen d'une plaque de polystyrène ou d'une boîte à sable (se reporter à la figure n° 76). **Attention,** cette disposition augmente encore la portée des encorbellements ;
- la dalle ne doit pas s'appuyer sur l'extrados dans la zone de clé (consulter la page 63 du guide) ;
- les charges permanentes et d'exploitation sont augmentées, ce qui peut avoir des effets néfaste sur la voûte et les fondations.

**> Conseils et détails constructifs à respecter :**

**Il faut procéder au remplacement partiel ou total du remplissage** si celui-ci ne présente pas les qualités requises (se reporter 6ème partie du guide FABEM 6.2).

**Si l'augmentation des charges n'est pas souhaitée** à cause de son impact sur la voûte et/ou les fondations. Il est possible :

- de procéder au remplacement du matériau de remplissage par un béton très léger (par exemple, les bétons avec des billes de polystyrène ont une masse volumique comprise entre 600 et 1600 kg/m³) et qui ne nécessite pas de compactage ;
- d'utiliser un béton léger pour la dalle (masse volumique ~ 1,800 kg/m³), mais il faut tenir compte du poids du ferraillage é~150 kg/m³, d'où une masse volumique du béton léger armé de l'ordre de 1900 kg/m³).

Dans le cas des **murs de tête ou en retour de grande hauteur,** la poussée combinée des matériaux de remplissage, du poids de la dalle et de ses superstructures et des charges d'exploitation peut imposer la mise en place de **voiles transversaux ou de tirants** pour rétablir leur stabilité.

**Les déformations transversales de la dalle** sous les effets du **retrait** et des **gradients thermiques** modifient un peu la répartition des charges sur le remblai et rendent possible l'appui de la dalle sur les tympans, si le jeu entre ces deux éléments est insuffisant.

Consulter la norme **NF P 11-213-1** qui, relative aux travaux de dallage, explicite tous ces phénomènes et donne des règles de calcul pour déterminer les sollicitations et les contraintes qui en résultent.

**Les tractions développées dans la dalle sous les déformations longitudinales dues au retrait et aux variations thermiques,** sont fonction **du coefficient de frottement de la dalle sur son support** lequel est difficile à maîtriser.

Consulter la norme **NF P 11-213-1** relative aux travaux de dallage. Elle conseille au minimum une couche de sable de 20 mm (compatible avec un film plastique). Elle indique qu'un film plastique employé seul ne peut jouer le rôle de couche de glissement.

En outre, il est conseillé d'utiliser des **bétons à très faible dosage en eau** pour réduire l'importance du retrait et de prévoir une **cure soignée (cf. le fascicule 65 du CCTG).**

Concernant le coefficient de frottement, le **guide du SETRA** (pages 65 et 66) renvoie à **sa fiche n°2,** à l'article sur **le viaduc de Belle-Feuille** paru dans la **revue TRAVAUX** de novembre 1993 et à la page 34 **du fascicule 74 du CCTG** relatif à la construction des réservoirs en béton

***ATTENTION :*** *la mise en œuvre de 2 films avec interposition d'un produit lubrifiant qui est utilisé sous certains dallages n'est pas à conseiller à cause d'un risque de glissement latéral qu'il faudrait bloquer par des dispositifs de guidage transversaux.*

Pour éviter que la dalle ne repose sur les murs de tête ou tympans, voire les murs en retour et/ou ne s'appuie trop près de ces murs, il faut disposer, soit des plaques de polystyrène, soit des boîtes à sable sur toute la longueur des murs. La solution boîte à sable est à privilégier.

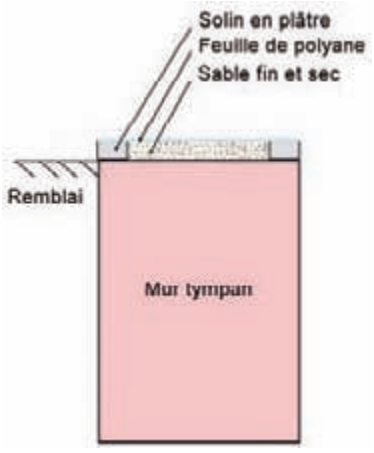



***Figure n° 77 : boîte à sable***

Après l'enlèvement des coffrages de la dalle, il faut retirer le polystyrène avec l'aide d'un solvant, comme l'essence, voire un chalumeau souvent trop agressif et/ou vider le sable des boîtes.

Il faut, de plus, **combler le vide longitudinal entre le sommet des murs et le dessous de la dalle** par un dispositif empêchant le passage des animaux, des plantes… (par exemple un joint de silicone appliqué sur un fond de joint).

### 6.3.2.1.4 Cas de la dalle générale appuyée sur le remplissage et les tympans

***ATTENTION : cette solution est déconseillée, à juste titre, par le guide du SETRA, car il y de grosses incertitudes sur la répartition des charges entre le remblai et les murs, ce qui rend le modèle de calcul très discutable.***

Ce type d'élargissement est décrit dans les pages 67 à 69 du **guide du SETRA.**

**> Conseils et détails constructifs à respecter :**

Un surfaçage de la partie supérieure des murs à l'aide d'un mortier doit être réalisé afin, d'une part, de protéger la tête des murs et, d'autre part, que le mortier qui sert d'appui à la dalle soit d'épaisseur constante (se reporter à la figure n° 76).

**Le guide du SETRA** (conformément à l'article B.6.1.1 du **BAEL 91**), dans les cas où la dalle s'appuie sur les tympans, c'est-à-dire les solutions 2) et 3), prévoit la mise en place d'un **coffrage perdu résilient en tête des tympans** pour éviter d'épaufrer les arêtes, **mais seulement du côté extérieur.**

**Il n'y a aucune raison de ne pas en prévoir un du côté intérieur.** Les déformations de la dalle ou «tuilage» peuvent avoir lieu vers le haut (effets des gradients thermiques) ou vers le bas (effets du retrait différentiel entre la fibre supérieure, qui est soumise à l'ensoleillement et la fibre inférieure, qui est protégée). Bien entendu, l'action des charges provoque aussi des déformations).

### 6.3.2.1.5 Cas de la dalle générale appuyée uniquement sur les tympans

Ce type d'élargissement est décrit dans les pages 69 à 71 du **guide du SETRA.**

**> Conseils et détails constructifs à respecter :**

Un surfaçage de la partie supérieure des murs à l'aide d'un mortier doit être réalisé afin, d'une part de protéger la tête des murs et, d'autre part que le mortier qui sert d'appui à la dalle soit d'épaisseur constante (se reporter à la figure n° 75 ci-dessus).

Pour éviter d'épaufrer les arêtes supérieures du côté intérieur comme du côté extérieur des murs, il faut placer un matériau souple, qui servira aussi de coffrage pour la dalle conformément à l'article B.6.1.1 du **BAEL 91.**

**Le fonctionnement de la structure est complètement modifié,** puisque tous les efforts (sauf le poids du remblai) passent dans les tympans.

Il faut donc calculer les efforts et déterminer le passage des descentes de charges dans les murs tympans.

Seules des arches de faible ouverture permettent aux efforts de transiter directement par les tympans vers les appuis. Si l'ouverture des arches est importante, les efforts doivent en partie passer par les voûtes avec un risque de cisaillement entre la douelle et le bandeau.

**Il est vivement conseillé de prévoir un serrage transversal des voûtes** pour éviter des désordres à la jonction entre la douelle et le bandeau.

**Le guide du SETRA** n'a pas évoqué **la solution d'élargissement suivante** avec appui sur les murs, solution décrite ci-dessous et qui s'inspire des dispositions utilisées pour permettre la dilatation des dalles des tunnels.

Pour élargir un pont étroit et de longueur moyenne ou importante, sous réserve que les murs tympans soient épais et résistants (hauteur importante), il est envisageable de faire reposer la dalle sur des appareils d'appui régulièrement espacés et reposant sur des chaînages réalisés en tête des murs. Entre les appareils d'appui, il faut prévoir des niches de vérinage destinées au réglage et au changement des appareils d'appui.

Si nécessaire, il faut relier les tympans par des voiles transversaux, ce qui permet de supprimer une partie du remplissage et, par là-même, d'autoriser l'accès à l'intrados de la dalle et aux emplacements de vérinage.

Pour éviter tout risque de déplacement transversal de la dalle, des dispositifs de guidage sont à prévoir. Une telle solution permet de réaliser la dalle sur les remblais d'accès pour la mettre en place par poussage (se reporter à la figure n° 78 ci-après).

Le chaînage doit être bétonné par tronçons alternés pour limiter les tractions dues aux effets du retrait qui pourraient causer des désordres dans les murs.

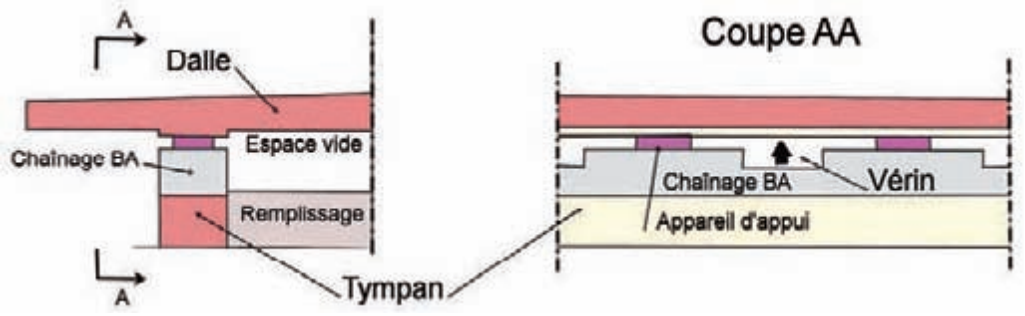



*Figure n° 78 : solution variante d'élargissement par dalle générale*

## 6.3.2.2 Cas de l'encorbellement avec contrepoids

Ce type d'élargissement est décrit dans les pages 78 à 84 **du guide du SETRA.**

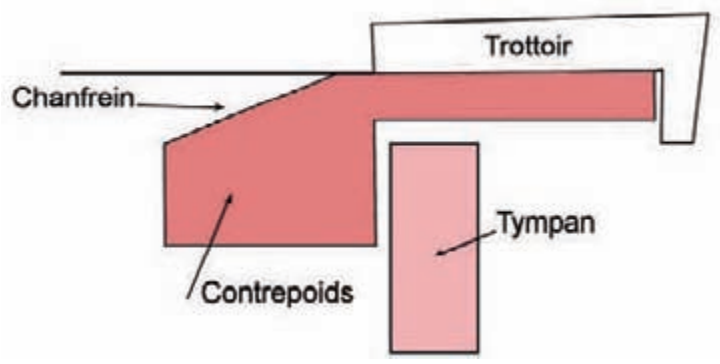



*Figure n° 79 : élargissement avec contrepoids*

**> Cette solution :**

- impose le démontage des parapets ;
- permet, si la largeur de l'ouvrage est suffisante, de réaliser les travaux avec un maintien partiel de la circulation ;
- réduit au maximum les coupures totales de circulation ;
- **rend complexe le drainage des eaux** et n'assure pas une étanchéité homogène sur toute la largeur du tablier (présence des joints longitudinaux) ;
- peut entraîner un orniérage sous le passage des camions, à cause des contrepoids situés en bordure de chaussée qui sont plus rigides que le remplissage. **Un chanfrein** est nécessaire pour limiter ce risque ;
- doit être adaptée en cas d'élargissement du tablier à ses extrémités ;
- **impose de déplacer les réseaux dans les trottoirs et/ou de les suspendre sous les encorbellements[26] ;**
- **rend plus délicats les travaux d'entretien des différentes couches de la chaussée avec un risque non négligeable d'endommagement de la chape d'étanchéité.**

**> Domaine d'emploi :**

- il faut que la hauteur disponible à la clé (entre le haut des tympans et l'extrados de la voûte) soit suffisante pour y loger le contrepoids, qui ne doit pas s'appuyer directement sur la voûte;
- cette solution est à envisager lorsque l'élargissement ne concerne que les trottoirs et en l'absence **d'autres solutions.**

**> Conseils et détails constructifs à respecter :**

Si l'élargissement ne concerne que les trottoirs, cette solution doit être comparée à la solution de construction de passerelles piétonnes latérales supportées par l'ouvrage ou indépendantes. En effet, ces solutions limitent au maximum la gêne à la circulation pendant les travaux et peuvent s'avérer moins coûteuses.

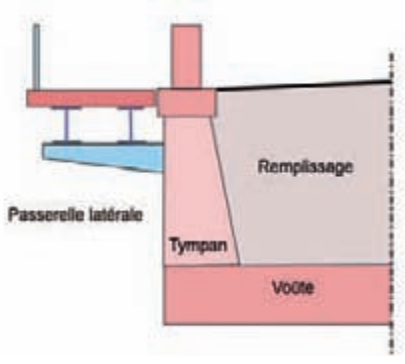



***Figure n° 80 : élargissement par passerelle latérale***

[26] *Il est normalement déconseillé, **sauf dispositions techniques particulières,** de faire passer certains réseaux dans le matériau de remplissage des ponts en maçonnerie à cause, d'une part, des travaux d'entretien des permissionnaires de voirie, qui peuvent causer des dommages et, d'autre part, des désordres que pourrait causer un incident sur le réseau, tel qu'une fuite d'eau (canalisations EP et EU).*

### 6.3.2.3 Cas de l'élargissement par un réseau de poutres transversales

Ce type d'élargissement est décrit dans les pages 84 à 87 du **guide du SETRA.**

Les poutres transversales, **qui reposent obligatoirement sur le remblai,** supportent sur leurs porte-à-faux les élargissements constitués par des dalles ou des poutres. **ATTENTION, elles ne doivent pas être appuyées sur les tympans, sous peine d'y provoquer des désordres.**

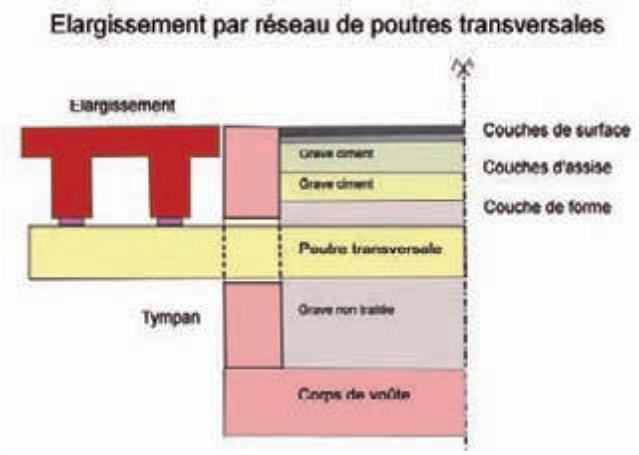



***Figure n° 81 : élargissement par réseau de poutres transversales***

**> Cette solution :**

- impose le démontage des parapets ;
- augmente la poussée sur les tympans, car les camions circulent à ras de ceux-ci ;
- réduit l'importance de la coupure totale de circulation grâce à l'utilisation de poutres préfabriquées dont la pose est rapide. La coupure est obligatoire pendant la pose des poutres ;
- **rend complexe le drainage des eaux,** n'assure pas une étanchéité homogène sur toute la largeur du tablier (présence des joints longitudinaux entre l'élargissement et les tympans) et **facilite des écoulements dommageables d'eau sur les tympans à cause des ouvertures pour le passage des poutres ;**
- peut entraîner un orniérage transversal sous le passage des camions à cause des points durs que constituent les poutres ;
- doit être adaptée en cas d'élargissement du tablier à ses extrémités ;
- **impose de déplacer les réseaux dans les trottoirs et/ou de les suspendre sous les encorbellements**[27] **;**
- **rend plus délicats les travaux d'entretien des différentes couches de la chaussée.**

[27] *Il est déconseillé, **sauf dispositions techniques particulières,** de faire passer certains réseaux dans le matériau de remplissage des ponts en maçonnerie à cause, d'une part, des travaux d'entretien des permissionnaires de voirie qui peuvent causer des dommages et, d'autre part, des désordres que pourrait causer un incident sur le réseau, tel qu'une fuite d'eau (canalisations EP et EU).*

> **Domaine d'emploi :**

- il faut que la hauteur disponible dans la zone de clé entre le haut des tympans et l'extrados de la voûte soit suffisante pour y loger les poutres, qui **ne doivent pas s'appuyer directement sur la voûte ;**
- cette solution n'est possible que si l'élargissement ne concerne que les trottoirs et en **l'absence d'autres solutions.**

**> Conseils et détails constructifs à respecter :**

Comme ce type d'élargissement ne concerne que les trottoirs, cette solution doit être comparée à la solution de la construction de passerelles piétonnes en position latérale et supportées par l'ouvrage ou indépendantes. En effet, ces solutions limitent au maximum la gêne à la circulation.

Il ne faut pas utiliser des poutres métalliques pour créer le réseau de poutres transversales, car la corrosion mettra rapidement en jeu leur intégrité.

## 6.3.3 ÉLARGISSEMENTS PAR DES STRUCTURES S'APPUYANT DIRECTEMENT SUR LES APPUIS DE L'OUVRAGE EXISTANT

Ces types d'élargissement peuvent être envisagés lorsque la force portante de la voûte s'avère insuffisante pour supporter l'élargissement envisagé, mais que les fondations sont en bon état et ont une capacité portante suffisante pour équilibrer les charges nouvelles.

**> Deux solutions classiques peuvent être envisagées :**

1) des poutres ou des dalles latérales reposant seulement au droit des appuis, voire en partie sur le remblai de remplissage ;

2) un tablier, le plus souvent une dalle générale, s'appuyant seulement au droit des appuis.

### 6.3.3.1 Cas des poutres ou des dalles latérales

Ce type d'élargissement est décrit dans les pages 87 à 91 du **guide du SETRA.**

**> Les poutres ou dalles latérales peuvent s'appuyer :**

1. sur des chevêtres, eux-mêmes reposant sur les appuis de l'ouvrage existant (renforcés ou non),
2. à la fois sur des chevêtres, eux-mêmes reposant sur les appuis de l'ouvrage existant (renforcés ou non), et sur le remblai des voûtes.

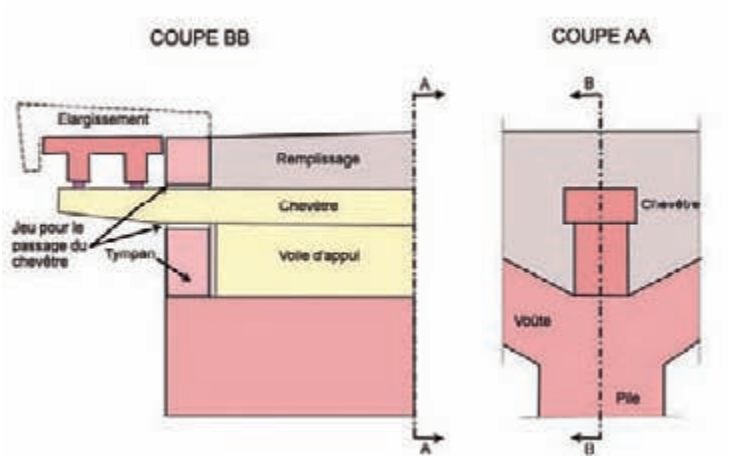



***Figure n° 82 : élargissement par poutres latérales (solution 1)***

Ces élargissements peuvent aussi s'appuyer directement sur les avant-becs, les arrières becs et les murs des culées, sous réserve que ces différents éléments soient correctement fondés et soient reliés à l'ouvrage existant.

***ATTENTION, compte tenu de leur rôle, surtout hydraulique, les avant-becs et arrière-becs de certains ponts en maçonnerie peuvent avoir été construits en console sur le corps des piles et n'être pas fondés.*** *La photo ci-après montre un exemple de mauvaise conception d'un élargissement.*

***Photo n° 92 : désordres dus à l'appui de l'élargissement sur un avant-bec mal fondé*** *(crédit photo LRPC)*

**> Dans la première solution (1), avec transfert direct des charges aux appuis :**

La voûte, outre son poids propre, continue de supporter le poids du remblai et les charges qui y circulent. Toutes les nouvelles charges apportées par l'élargissement sont reprises directement par les fondations existantes, renforcées ou non, sans intéresser la voûte.

**> Dans la seconde solution (2), avec transfert des charges sur le remblai et sur les appuis :**

La voûte, outre son poids propre, continue de supporter le poids du remblai et les charges qui y circulent et encaisse en plus une partie des charges apportées par l'élargissement (se reporter au guide du SETRA).

**> Ces deux solutions :**

- **imposent le démontage des parapets ;**
- permettent, sauf pendant la construction des chevêtres où l'interruption de circulation est totale, de **maintenir le passage du trafic** avec, cependant, quelques interruptions limitées. Toutefois, dans le cas où la nouvelle structure s'appuie en partie sur le remblai, la réduction de la largeur de la zone circulable peut entraîner des difficultés pour maintenir la circulation (obligation d'un alternat ou d'une réduction de la largeur des voies) ;
- imposent des dénivellations transversales différentielles entre l'ancienne structure, dont les déformations sous charges sont nulles, et la nouvelle structure relativement souple et donc soumise aux déformations différées par fluage sous les charges permanentes et aux déformations instantanées sous les charges d'exploitation. Ces dénivelées ont une incidence fâcheuse sur les joints longitudinaux et l'étanchéité. **Il faut impérativement éviter que les bandes de roulement des véhicules se situent au droit des joints longitudinaux. ATTENTION à la stabilité et à la résistance des longrines de couronnement des tympans ;**
- **rendent complexe le drainage des eaux** et n'assure pas une étanchéité homogène sur toute la largeur du tablier. La solution (1) impose, en plus, des joints de dilatation longitudinaux entre l'ouvrage existant et son élargissement ;
- entraînent un risque d'orniérage au droit des chevêtres transversaux, sauf s'ils sont suffisamment enterrés. La solution (2), peut provoquer, en outre, un orniérage sous le passage des camions à cause des contrepoids situés en bordure de chaussée, qui sont plus rigides que le remplissage ;
- s'adaptent facilement en cas d'élargissement de l'ouvrage à ses extrémités ;
- **imposent dans le cas de la solution (2) de déplacer les réseaux dans les trottoirs et/ou de les suspendre sous les encorbellements[28] ;**
- **rendent plus délicats les travaux d'entretien des différentes couches de la chaussée, avec un risque non négligeable d'endommagement de la chape d'étanchéité et, dans le cas de la solution (1), des joints de dilatation. ;**
- présentent un aspect peu satisfaisant avec l'opposition des lignes droites de l'élargissement et les lignes courbes de la voûte. Une étude architecturale peut s'imposer si l'ouvrage est visible du public, avec le choix de poutres de hauteur variable, de masques, etc.

[28] *Il est déconseillé, **sauf dispositions techniques particulières,** de faire passer certains réseaux dans le matériau de remplissage des ponts en maçonnerie à cause, d'une part, des travaux d'entretien des permissionnaires de voirie qui peuvent causer des dommages et, d'autre part, des désordres que pourrait causer un incident sur le réseau, tel qu'une fuite d'eau (canalisations EP et EU).*

**> Domaine d'emploi : ce type d'élargissement n'est envisageable :**

- que pour les **ouvrages de faible portée,** à cause des déformations différentielles entre les voûtes et les élargissements ;
- **qu'aux ouvrages de faible longueur dans le cas de la solution (2), car les variations dimensionnelles sont gênées par la longrine appuyée sur le remblai ;**
- que si la stabilité des élargissements ne risque pas d'être mise en cause par un choc (véhicule ou bateau hors gabarit).

## 6.3.3.2 Cas d'un tablier de toute largeur reposant sur les appuis de l'ouvrage existant

Ce type d'élargissement est décrit dans la page 91 du **guide du SETRA.**

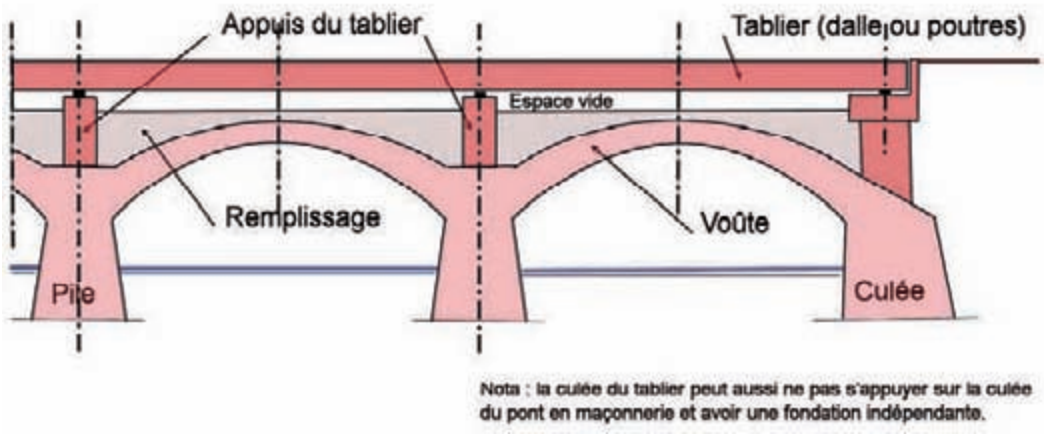

Appuis du tablier
Tablier (dalle ou poutres)
Espace vide
Remplissage
Voûte
Pile
Culée
Nota : la culée du tablier peut aussi ne pas s'appuyer sur la culée du pont en maçonnerie et avoir une fondation indépendante.

***Figure n° 83 : élargissement par un tablier de toute largeur reposant sur les appuis de l'ouvrage en maçonnerie***

Le tablier, le plus souvent une **dalle générale,** est réalisée au-dessus de l'ouvrage existant. Il s'appuie au droit des piles ou des culées de celui-ci. Les fondations de ces appuis doivent parfois être renforcées pour reprendre le supplément de charge.

Dans une telle solution, les voûtes continuent à supporter leur poids propre et le poids du remblai qui reste entre les tympans. Seules les piles, les culées et leurs fondations sont concernées par l'application des nouvelles charges permanentes (poids du tablier, poids de ses superstructures et poids des chevêtres d'appui du tablier au droit des piles ou des culées) et des charges d'exploitation plus importantes.

**> Cette solution :**

- permet de concevoir un tablier de grande largeur sans être gêné par la géométrie de l'ouvrage existant, sous réserve que la force portante des fondation des appuis de l'ouvrage existant soit suffisante ou qu'un renforcement soit possible ;
- **facilite le drainage des eaux** et assure une bonne étanchéité, sauf aux extrémités où des tranchées drainantes sont nécessaires ;
- **protège le pont existant et facilite les travaux d'entretien de la couche de roulement ;**
- s'adapte si l'ouvrage existant s'élargit à ses extrémités ;
- présente, normalement, un aspect satisfaisant ;
- oblige à une **coupure totale de la circulation** durant la durée de la réalisation du nouveau tablier, **ainsi qu'au démontage des parapets ;**
- augmente les descentes de charges sur les appuis et leurs fondations. **Cependant, l'enlèvement partiel du matériau de remplissage, l'utilisation d'un béton léger pour la réalisation du tablier, voire le remplacement du tablier béton par une structure métallique, peuvent limiter au maximum l'augmentation des descentes de charges ;**
- impose de déplacer les réseaux dans les trottoirs et/ou de les suspendre sous les encorbellements[29] ;
- nécessite de prévoir des moyens d'accès à l'intrados du nouveau tablier pour en permettre la surveillance et l'entretien. Il faut, pour éviter les effets néfaste de la condensation, ventiler le vide compris entre le nouveau tablier et l'ouvrage existante, tout particulièrement si le tablier est métallique ;
- **impose la présence de joints de dilatation transversaux** pour permettre la libre déformation du tablier. Il faut donc réaliser, à chaque extrémité, un chevêtre d'appui du tablier et un mur garde grève.

**> Conseils :**

Pour les ouvrages de faible longueur comportant une, voire deux voûtes, il est possible de créer des culées enterrées fondées sur pieux pour s'affranchir de tout problème de force portante des voûtes et des fondations des culées existantes (cette solution peut permettre, si nécessaire, de démolir l'ouvrage existant en sous-œuvre).

[29] *Il est déconseillé, **sauf dispositions techniques particulières,** de faire passer certains réseaux dans le matériau de remplissage des ponts en maçonnerie à cause, d'une part, des travaux d'entretien des permissionnaires de voirie qui peuvent causer des dommages et, d'autre part, des désordres que pourrait causer un incident sur le réseau, tel qu'une fuite d'eau (canalisations EP et EU).*

## 6.3.4 ÉLARGISSEMENTS PAR DES STRUCTURES ACCOLÉES À L'OUVRAGE EXISTANT

Ces types d'élargissement sont décrits dans les pages 91 à 101 du **guide du SETRA.**

Ces élargissements consistent **à construire un nouvel ouvrage,** les plus souvent **accolé à l'ouvrage existant, mais ce peut être à quelques mètres de celui-ci. Dans ce dernier cas, des poutres ou des dalles transversales s'appuyant sur le nouvel ouvrage et l'ancien seront nécessaires.** Ce nouvel ouvrage a ses appuis et fondations propres indépendantes de l'ouvrage existant.

***ATTENTION, la réalisation des nouvelles fondations peut interférer avec les fondations existantes et mettre leur stabilité en cause comme le montrent les deux figures qui suivent.***

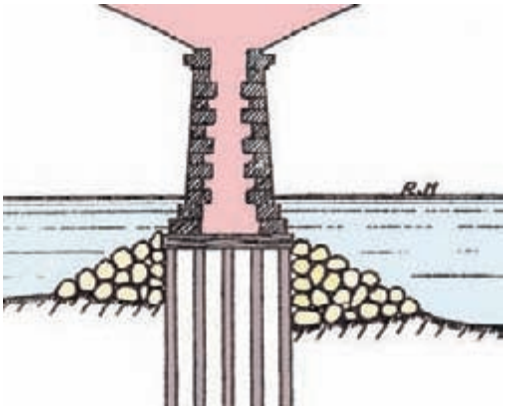


***Figure n° 84 : fondation du pont de l'Archevêché qui devrait pouvoir s'accommoder d'un élargissement par structure accolée***
*(extrait du cours de pont de l'ENTPE de 1959 par G. Grattesat)*

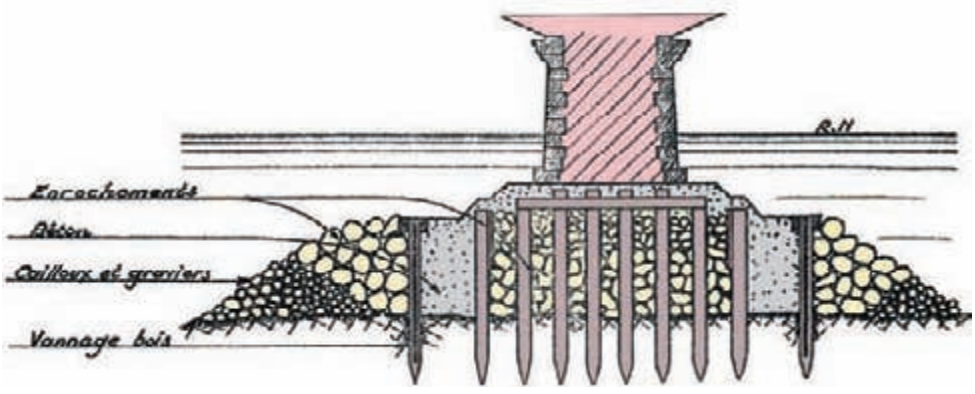



***Figure n° 85 : fondation du pont des Invalides qui ne semble guère être compatible avec un élargissement par structure accolée***
*(extrait du cours de pont de l'ENTPE en 1959 par G. Grattesat)*

**> Plusieurs solutions classiques peuvent être envisagées :**

- 1) des voûtes en maçonnerie comme au pont de la Concorde à Paris (voir les photos ci-après qui montrent une simple juxtaposition des deux structures avec un joint longitudinal) ;
- 2)des voûtes en béton armé ou non armé, comme au pont de Bercy dont les travaux d'élargissement ont été réalisés entre 1989 et 1992 ;
- 3) des ponts cadres fermés ou des portiques ouverts simples ou multiples ;
- 4) des buses préfabriquées métalliques ou en béton ;
- 5) des ponts-dalles, des ponts à nervures coulés en place ou des ponts à poutres préfabriquées…

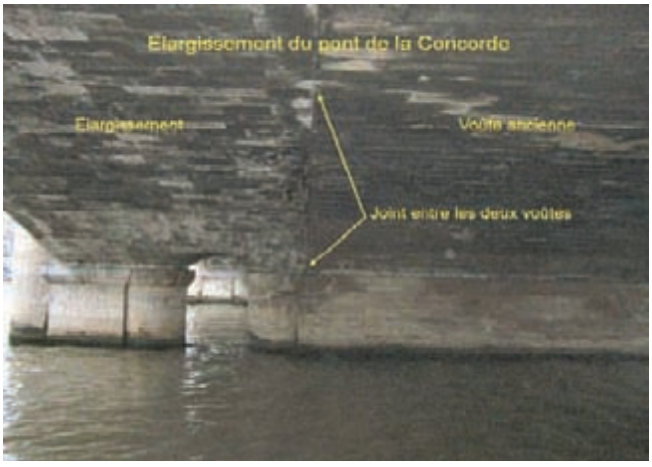



***Photo n° 93 : élargissement du pont de la Concorde entre 1930 et 1932*** *(crédit photo D. Poineau)*

***Photo n° 94 : détail de l'élargissement du pont de la Concorde*** *(crédit photo D. Poineau)*

**> Ces diverses solutions présentent les avantages communs suivants :**

- l'élargissement est indépendant de la structure existante et peut donc avoir une géométrie et des dimensions quelconques. Il peut être disposé, soit d'un seul côté, soit symétriquement par rapport à l'ouvrage existant ;
- la largeur de l'élargissement peut être quelconque ;
- les travaux se font avec un minimum de gêne à la circulation ;
- la charge portante du nouvel ouvrage peut être adaptée aux besoins exprimés, comme le passage de convois exceptionnels très lourds (400 tonnes et plus). **ATTENTION, cependant, aux risques engendrés par un passage accidentel d'un convoi lourd sur l'ancien pont ;**
- le transfert des réseaux sur le nouveau pont.

**> Ces diverses solutions présentent les inconvénients communs suivants :**

- **la réalisation de nouvelles fondations à proximité de celles de l'ancien pont est très délicate ;**
- la différence de déformabilité (cas des cadres, des buses métalliques, des dalles et des poutres) pose souvent des problèmes, en particulier dans le domaine de l'étanchéité (se reporter aux photos ci-après) ;
- l'aspect esthétique de l'ouvrage est d'un traitement délicat, en particulier dans le cas d'un élargissement dissymétrique par un pont cadre ou un pont-dalle et si la structure est visible par le public. En rase campagne le problème est moins crucial ;
- à cause des différences entre les géométries des deux ouvrages accolés (cas des cadres, des portiques…), l'écoulement des eaux peut être bloqué par une accumulation de branchage lorsque l'élargissement se situe à l'amont de l'ouvrage existant ;
- l'ouvrage en maçonnerie peut conserver une espérance de vie nettement supérieure à celle du nouvel ouvrage (cas d'un élargissement par une buse métallique) !

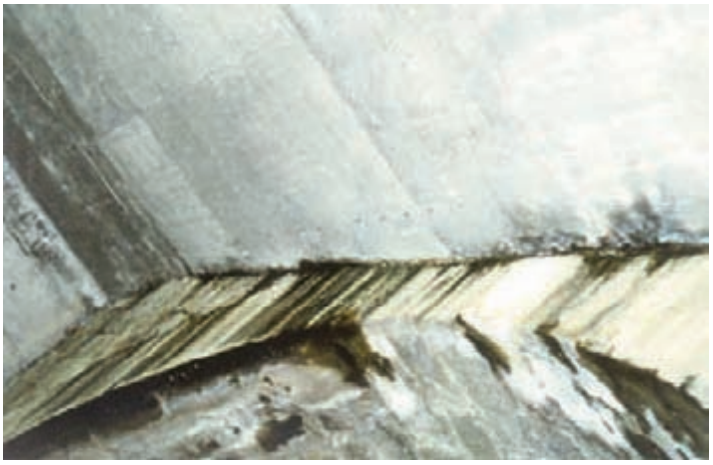


***Photo n° 95 : mauvaise étanchéité du joint longitudinal entre l'ancien et le nouvel ouvrage*** *(crédit photo CDOA Corse)*

***Photo n° 96 : mauvaise réalisation du joint longitudinal entre l'ancien et le nouvel ouvrage et débouchés superficiels très différents*** *(crédit photo CDOA Corse)*

**> Domaine d'emploi :**

- ouverture ≤ 10 m : buses préfabriquées métalliques ou béton ;
- 5 ≤ ouverture ≤ 15 m : ponts en cadres fermés et en portiques ouverts ;
- 15 ≤ ouverture ≤ 25 m : ponts-dalles, ponts à nervures ;
- ≥ 25 m : ponts à poutres…

**> Conseils :**

**Le choix d'une solution avec une buse métallique est fortement déconseillé, car son espérance de durée de vie est relativement limitée. Ce type d'élargissement est actuellement abandonné.**

**Le guide du SETRA,** qui analyse les différentes solutions d'élargissement développées plus haut avec leurs avantages et inconvénients, suggère les bonnes dispositions. **Le présent guide FABEM 6.3 attire l'attention des concepteurs et des exécutants sur les deux points suivants :**

- l'importance du **choix et de l'exécution des fondations du nouvel ouvrage** en fonction des fondations de l'ancien ouvrage et de leur état ;
- la conception et la réalisation du **joint longitudinal** qui doit, d'une part, résister au passage des véhicules, sauf s'il se trouve dans une zone non circulée, par exemple en cas de chaussées séparées et, d'autre part, assurer une étanchéité durable.

# 6.3.5 AUTRES TYPES D'ÉLARGISSEMENTS

Ces types d'élargissement sont décrits dans les pages 101 et 102 du **guide du SETRA.**

**> D'autres types d'élargissement peuvent être réalisés, le guide cite :**

- l'élargissement par prolongation des voûtes ;
- l'élargissement par pontage, c'est-à-dire la réalisation d'un pont par-dessus l'ouvrage existant et totalement indépendant de ce dernier (principe d'élargissement évoqué ci-devant).

## 6.3.5.1 Élargissements par prolongation de voûtes

Dans un tel cas, après démontage du tympan, une nouvelle voûte solidaire de la précédente est construite sur des appuis et fondations prolongés également. Ensuite, le tympan est reconstruit.

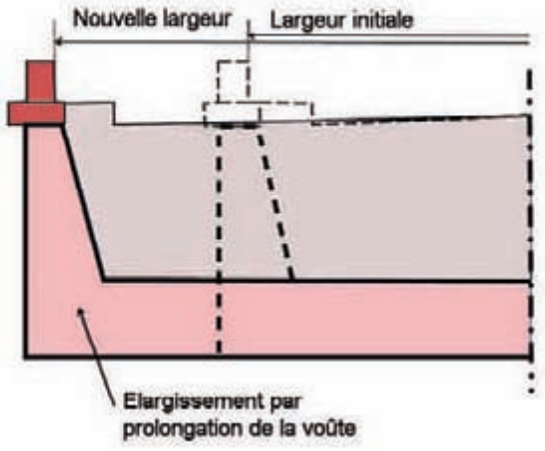



*Figure n° 86 : élargissement par prolongation de la voûte*

**> Conseils :**

**Le guide du SETRA limite ce type d'élargissement à des ponceaux de moins de 3 m d'ouverture,** sûrement à cause du coût d'une telle opération.

Il faut considérer que cette solution peut être utilisée pour l'élargissement de ponts en maçonnerie d'ouverture quelconque, sous réserve qu'ils soient de caractère, classés ou dans le périmètre d'un monument historique et si le **maître d'ouvrage** est en mesure de financer une telle opération.

## 6.3.5.2 Élargissements de type «pontage»

Cette solution est utilisable pour des ouvrages de faible longueur comportant une, voire deux voûtes, dont l'élargissement par les solutions susvisées s'avère impossible pour cause de force portante insuffisance des voûtes ou des fondations, de désordres dans les voûtes, de passage de convois exceptionnels très lourds… Dans un tel cas, un pont (le plus souvent une dalle) est construit au dessus du pont existant avec ses fondations propres.

**> Conseils et détails constructifs à respecter :**

Une telle solution peut nécessiter le relèvement du profil en long si la hauteur disponible à la clé entre l'extrados de la voûte et le dessus de la chaussée est insuffisante.

La solution proposée dans la fiche n°16 du guide du SETRA présente le **gros inconvénient** de ne pas permettre **l'inspection de l'intrados** du pont-dalle enjambant la voûte en maçonnerie. Il est possible de s'affranchir de cet inconvénient en remontant le profil en long ou en démolissant le pont en maçonnerie, sous réserve de quelques adaptations du projet.

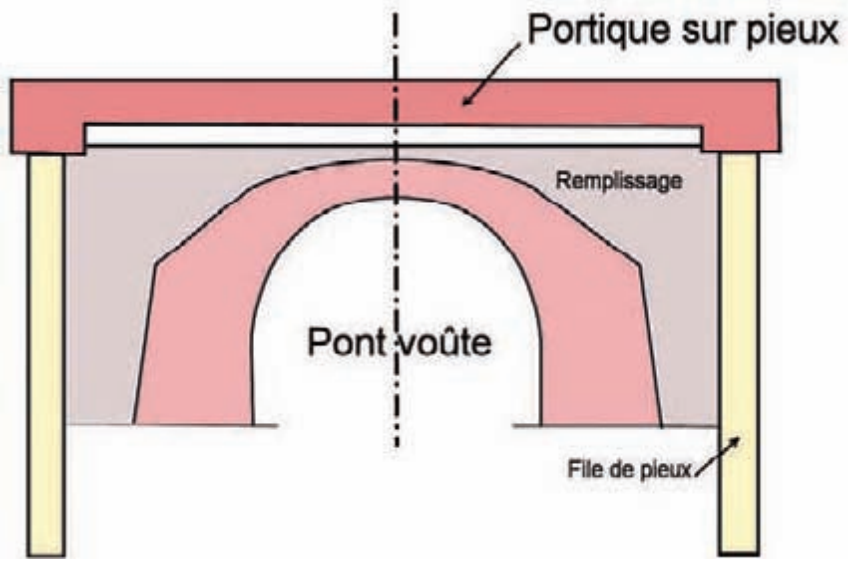



*Figure n° 87 : élargissement de type pontage*

# 6.3.6 MÉTHODES D'EXÉCUTION DES ÉLARGISSEMENTS PAR LE DESSUS

***Photo n° 97 : coffrage pour la réalisation de la dalle générale d'élargissement du pont de Villeneuve-Loubet*** *(crédit photo P. Vion)*

**Le guide du SETRA** et ses fiches techniques présentent différentes méthodes d'exécution applicables aux différents types d'élargissement. Suivant le cas, un type d'élargissement donné peut être exécuté, soit in-situ par coulage en place, soit en utilisant des éléments préfabriqués liés ensuite par un béton de clavage ou par de la précontrainte après leur mise en place sur l'ouvrage à élargir… Il est également possible de réaliser l'élargissement à proximité de l'ouvrage et ensuite le mettre en place, soit par la technique du poussage (cas de la réalisation de l'élargissement sur le remblai d'accès), soit par la technique du ripage transversal (cas de la réalisation de l'élargissement sur un étaiement construit parallèlement à l'ouvrage existant)…

En fonction des contraintes fixées par le **maître d'ouvrage** (par exemple, réduction au maximum de la gêne aux usagers), le projet de l'élargissement doit à la fois proposer une, voire plusieurs solutions d'élargissement, mais aussi la ou les méthode(s) d'exécution associées.

***Photo n° 98 : équipage mobile utilisé pour la réalisation de la dalle générale d'élargissement du pont dit de 100 mètres*** *(crédit photo DDE 52)*

***Photo n° 99 : débouché insuffisant*** *(extrait Directmatin du lundi 12 septembre 2009 photo AFP)*

**> Le guide du SETRA n'aborde pas le cas où les ouvertures des voûtes d'un pont en maçonnerie, dans son rôle de passage inférieur, s'avèrent insuffisantes :**

- soit pour assurer le passage des débits de crue d'un cours d'eau (incidence de l'urbanisation sur l'écoulement des eaux) et aussi le passage des encombrants de bois et autres objets qui, très souvent, transportés par les eaux, viennent boucher les voûtes et former un barrage qui provoque ensuite une vague dévastatrice[30] ;
- soit pour permettre le passage du trafic (insuffisance de gabarit en largeur ou en hauteur, élargissement d'une chaussée, etc.)…

**Les solutions, dans la suite du présent texte,** sont simplement évoquées sans aucun développement. Chacune de ces solutions présente des avantages et des inconvénients qu'il convient d'évaluer avant de procéder à un choix.

## 6.4.1 CAS DE L'ÉLARGISSEMENT D'UN COURS D'EAU

**> L'augmentation de la section de passage des eaux peut être obtenue par les solutions suivantes, en partant de la plus simple à la plus complexe :**

- l'abaissement du profil en long de la chaussée, ce qui rend celle-ci submersible par temps de crues importantes ;
- la construction d'ouvrages de décharge à proximité ;
- l'aménagement du cours d'eau de part et d'autre de l'ouvrage pour accélérer la vitesse du courant, donc le débit, mais sans mettre en péril, par affouillement, la stabilité des fondations de l'ouvrage existant ;
- la démolition suivie d'une reconstruction de l'ouvrage, mais avec une ouverture plus importante…

*30 Inondations de la ville de Crécy en juin 2009 près de Paris et inondations de la ville de Sainte-Maxime et de Saint-Pons-les-Mures le 19 septembre 2009 dans le Sud de la France, inondations spectaculaires et catastrophiques de l'île de Madère du 20 février 2010…*

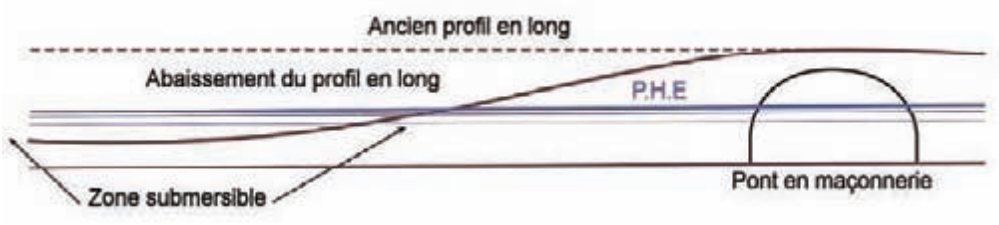



*Figure n° 88 : abaissement du profil en long pour créer une zone submersible*

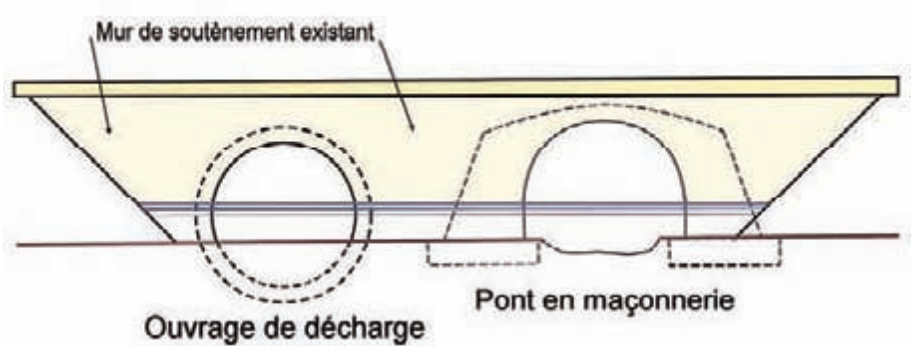



*Figure n° 89 : création d'un ouvrage de décharge*

## 6.4.2 CAS DE L'ÉLARGISSEMENT D'UNE CHAUSSÉE

*Photo n° 100 : création d'une nouvelle voûte sous l'aqueduc d'Arcueil-Cachan (crédit photo D. Poineau)*

**> L'augmentation de la section de passage du trafic peut être obtenue par les solutions suivantes, en partant de la plus simple à la plus complexe :**

- la construction d'un nouvel ouvrage très proche de l'ancien pour permettre le passage d'un sens de circulation dans le cas d'une route à chaussées séparées. Il est aussi possible, sur une chaussée bidirectionnelle, de séparer les sens de circulation à l'aval et à l'amont de l'ouvrage existant ;
- si l'ouvrage existant est encadré par des murs de soutènement d'une longueur suffisante, il est possible d'envisager la construction d'une arche supplémentaire. Une telle solution a été utilisée pour améliorer la largeur de la rue de Provigny au passage de l'aqueduc de la Bièvre entre Cachan et Arcueil ;
- la démolition suivie d'une reconstruction de l'ouvrage, mais avec une ouverture plus importante…

## 6.4.3 MÉTHODES D'EXÉCUTION DES SOLUTIONS D'AUGMENTATION DU DÉBOUCHÉ

Pour la réalisation d'un ouvrage de décharge ou d'un nouvel ouvrage sous une route existante, dans le cas où une déviation par une autre voie ou juste au droit du chantier ne peut être réalisée, il est possible d'avoir recours aux techniques utilisées par la **SNCF** et la **RATP** pour réaliser des ouvrages avec une coupure du trafic réduite au maximum. Une des technique consiste à construire le futur passage inférieur de type cadre ou portique juste à côté de son emplacement définitif. Ensuite, l'ouvrage est mis en place par fonçage au travers du remblai ou par poussage après l'ouverture d'un passage dans le remblai, la brèche étant immédiatement remblayée dès que l'ouvrage est à sa place définitive.

Les matériaux à mettre en œuvre (pierres de taille, moellons, béton, armatures, coffrages…) sont déjà traités dans les autres parties des guides «Maçonnerie» et également dans les **fascicules du CCTG… De même, le matériau de remplissage au-dessus des voûtes est traité dans la 6ème partie du guide FABEM 6.2** (reconnaissance du **matériau de remplissage** existant au dessus des voûtes, **choix du matériau de substitution, couches d'assise et de surface et de la couche d'interface** à disposer, par exemple, entre le remplissage et une dalle générale).

**> Ce développement sur le matériau de remplissage et les différentes couches d'une chaussée est nécessaire car :**

- **le guide du SETRA de 2001** sur l'élargissement des ponts en maçonnerie renvoie dans ses pages 115 et 116 au guide **pour les terrassements routiers (GTR de 1992),** mais sans faire de développement particulier ;
- **le guide du SETRA de 1992** sur la protection contre les eaux des ponts en maçonnerie renvoie à **l'ancien GTR de 1986.** Cependant, dans ses pages 18 à 21, il liste les essais à effectuer, fixe dans quels cas il faut remplacer le remplissage, détaille la façon de procéder et les précautions à prendre.

**Ce développement s'impose aussi, car ces deux documents ne donnent pas les références des normes d'essai à mettre en œuvre.**

# 6.6 Réception des travaux (pour mémoire)

**Se reporter au paragraphe 5.11 du guide FABEM 6.1.**

> ***Rappel,*** *lorsque les travaux concernent un* ***renforcement structural,*** *lors de* ***la réception des travaux,*** *il convient de s'assurer que le renforcement participe effectivement à la reprise des efforts.* ***Le marché*** *doit spécifier les essais à effectuer pour en apporter la preuve. Ces essais peuvent être proposés à l'acceptation du* ***maître d'œuvre*** *par* ***l'entrepreneur****.*

Normalement, si les résultats des contrôles effectués lors de la mise en œuvre des boulons d'ancrage ou des broches ou des tirants d'enserrement sont satisfaisants, cela peut suffire pour permettre la réception des travaux.

Si lors des études préliminaires, certaines fissures ont été équipées et que des mesures de leur souffle sous un chargement ou les variations thermiques ont été effectuées, le **marché** peut imposer que de nouvelles mesures soient effectuées sur les fissures injectées après mise en œuvre des renforcements.

## LISTE DES FIGURES


Figure n° 1 : appareillage divers ..... 20

Figure n° 2 : divers appareillage de briques (extrait Wikipédia) ..... 24

Figure n° 3 : coupe schématique d'un seuil en aval d'un pont ..... 38

Figure n° 4 : principe de la protection par des enrochements encastrés dans le lit ..... 40

Figure n° 5 : protection de fondations anciennes par des talus d'enrochement (extrait du tome II du traité des ponts en maçonnerie et tunnels de J ; Chaix et Chambaret – Éditeur : Fanchon et Artus [Paris] vers 1889) ..... 41

Figure n° 6 : dispositions à respecter lors de la réalisation d'une protection par enrochements ..... 45

Figure n° 7 : fuseau blocométrique d'enrochement (4 à 60 kg) et blocométrie des enrochements (4 à 60 kg) ..... 48

Figure n° 8 : gabions ..... 50

Figure n° 9 : exemple de gabions disposés en buton de coffrage ..... 51

Figure n° 10 : exemple de pose d'un tapis de gabions munis de filtre géotextile en protection des fonds de rivière ..... 52

Figure n° 11 : ensouillement de la bordure d'un tapis de gabions par affouillement ..... 53

Figure n° 12 : exemple de comblement de cavité par des sacs de sable ultérieurement injectés après réalisation d'un voile parafouille périphérique ..... 55

Figure n° 13 : Réparation d'une tête de pieu en bois sous un platelage ..... 59

Figure n° 14 : principe de réparation d'un pieu en béton armé par gainage ..... 59

Figure n° 15 : schéma de principe du radier général ..... 62

Figure n° 16 : projet de radier général en forme de voûte inversée avec petit corsetage des appuis pour renforcer la structure ..... 62

Figure n° 17 : exemple de la protection des sols au pourtour d'un appui par des éléments de blocs préfabriqués ..... 64

Figure n° 18 : la fiche des palplanches n'augmente pas la profondeur du niveau de fondation ..... 67

Figure n° 19 : principe d'éclissage des palplanches ..... 72

Figure n° 20 : principe de ripage des palplanches ..... 73

Figure n° 21 : découpage des joints

Figure n° 22 : le voile vertical en béton ou le rideau de palplanches, une solution souvent proposée pour réparer les fondations, mais qui doit être amélioré ..... 78

# Table des illustrations


Figure n° 23 : exemple d'un massif de béton de chaux désorganisé conforté par un corset en béton armé et une injection de régénération du liant....80

Figure n° 24 : exemple d'espacement des forages....88

Figure n° 25 : injection à l'avancement par passe descendante....89

Figure n° 26 : injection au tube crépiné....90

Figure n° 27 : injection au tube à manchettes....90

Figure n° 28 : réalisation d'une injection solide de renforcement de la portance d'une fondation du pont de Verdun à ANGERS....97

Figure n° 29 : reprise en sous-œuvre par micropieux d'une fondation sur pieux en bois105

Figure n° 30 : principe de l'essai d'ancrage....115

Figure n° 31 : limites d'injectabilité des coulis en fonction de la perméabilité des terrains....118

Figure n° 32 : schémas de centrales d'injection....123

Figure n° 33 : croquis explicatif : boulon d'ancrage de type 1 ou 2....141

Figure n° 34 : bonne disposition des armatures de brochage....145

Figure n° 35 : les trois sortes de boulons d'ancrage (d'après la documentation DSI France)....151

Figure n° 36 : cheville métallique pour béton à expansion par vissage à couple contrôlé (extrait de l'ATE n°001)....155

Figure n° 37 : schéma d'une broche....156

Figure n° 38 : schéma d'implantation des broches....157

Figure n° 39 : mur de liaison transversale et tirants d'enserrement....159

Figure n° 40 : principe de renforcement d'un mur en maçonnerie de briques....160

Figure n° 41 : schéma d'une tête d'ancrage avec plaque de répartition....166

Figure n° 42 : fiche technique avec le schéma d'un marteau fond de trou (extrait documentation Technidrill/DGA)....182

Figure n° 43 : fiche technique d'un système de tubage à l'avancement (extrait de la documentation STAREX - APAGEO)....184

Figure n° 44 : mise en œuvre d'un ancrage continu du système MAI (crédit photo Atlas Copco)....185

Figure n° 45 : principe de fonctionnement d'un pot à pression....193

Figure n° 46 : schéma d'un boulon d'ancrage avec ses 3 parties....195

Figure n° 47 : schéma d'un forage au carottier....200

Figure n° 48 : schéma d'une broche....202

Figure n° 49 : solution à deux lits de tirants....208
Figure n° 50 : principe à appliquer pour centrer le forage....208
Figure n° 51 : tirant d'enserrement avec protection renforcée....209
Figure n° 52 : disposition des plaques de répartition (attention à leur protection)....210
Figure n° 53 : protection d'un tirant actif....214
Figure n° 54 : exemple de cachetage d'une tête d'ancrage....215
Figure n° 55 : courbes d'enregistrement des mesures de tensions....223
Figure n° 56 : composition des forces (par simplification, le poids de la longrine a été négligé)....235
Figure n° 57 : schéma de principe d'une contre-voûte à base de profilés métalliques...236
Figure n° 58 : détail de l'appui de la contre-voûte préfabriquée....237
Figure n° 59 : principe de réalisation de corbeaux ou d'une longrine d'appui avec clés de cisaillement....238
Figure n° 60 : dispositif de glissement de la contre-voûte du pont de Levallois....239
Figure n° 61 : contre-voûte mince en béton projeté....240
Figure n° 62 : contre-voûte épaisse en béton projeté....241
Figure n° 63 : détail de l'appui de la contre-voûte à base de profilés métalliques (extrait du bulletin n°2 : Incidents sur ouvrages - fiche n° 1.2)....245
Figure n° 64 : contre-voûte à base de profilés métalliques enrobés de béton (document fourni par JL. Michotey)....246
Figure n° 65 : exemple de ferraillage d'une contre-voûte (document fourni par JL. Michotey)....247
Figure n° 66 : ceinturage de protection d'une pile en maçonnerie....251
Figure n° 67 : schéma de principe d'un ceinturage par monotorons....252
Figure n° 68 : schéma d'un ceinturage par câbles de précontrainte....253
Figure n° 69 : ceinturage métallique : vue en plan....253
Figure n° 70 : ceinturage métallique : vue en élévation....254
Figure n° 71 : schéma de principe dans le sens longitudinal....262
Figure n° 72 : détail du dispositif de vérinage....263
Figure n° 73 : schéma de principe en plan....263
Figure n° 74 : l'élargissement du pont des Invalides (extrait du cours de ponts de l'ENTPE 1959 par G. Grattesat)....268
Figure n° 75 : exemple de fondations à redans pouvant fragiliser les murs en retour...273

Figure n° 76 : trois types d'élargissements par dalle générale ..... 278
Figure n° 77 : boîte à sable ..... 283
Figure n° 78 : solution variante d'élargissement par dalle générale ..... 285
Figure n° 79 : élargissement avec contrepoids ..... 285
Figure n° 80 : élargissement par passerelle latérale ..... 286
Figure n° 81 : élargissement par réseau de poutres transversales ..... 287
Figure n° 82 : élargissement par poutres latérales (solution a.) ..... 289
Figure n° 83 : élargissement par un tablier de toute largeur reposant sur les appuis de l'ouvrage en maçonnerie ..... 291
Figure n° 84 : fondation du pont de l'Archevêché qui devrait pouvoir s'accommoder d'un élargissement par structure accolée (extrait du cours de pont de l'ENTPE de 1959 par G. Grattesat) ..... 293
Figure n° 85 : fondation du pont des Invalides qui ne semble guère être compatible avec un élargissement par structure accolée (extrait du cours de pont de l'ENTPE en 1959 par G. Grattesat) ..... 293
Figure n° 86 : élargissement par prolongation de la voûte ..... 297
Figure n° 87 : élargissement de type pontage ..... 298
Figure n° 88 : abaissement du profil en long pour créer une zone submersible ..... 301
Figure n° 89 : création d'un ouvrage de décharge ..... 301

## LISTE DES PHOTOS

Photo n° 1 : résultat d'un choc sur le parapet d'un pont en maçonnerie (crédit photo Cofex Littoral) ..... 12
Photo n° 2 : effondrement partiel d'un mur (crédit photo Cofex Littoral) ..... 13
Photo n° 3 : effondrement partiel d'une pile en maçonnerie (crédit photo DDE 70) ..... 13
Photo n° 4 : repérage des moellons des tympans du pont de Villeneuve-Loubet avant leur démontage (crédit photo P. Vion) ..... 16
Photo n° 5 : stockage des pierres récupérées après la destruction du pont de Mostar (crédit photo A. Bouineau) ..... 17
Photo n° 6 : purge et rescindement de la maçonnerie existante (crédit photo J.-L.. Michotey) ..... 21

Photo n° 7 : travaux de réfection terminée pour la maçonnerie de moellons assisés (crédit photo JL. Michotey) ....21

Photo n° 8 : reconstruction d'un tympan en moellons assisés (crédit photo JL. Michotey) ....23

Photo n° 9 : réfection partielle d'une voûte en briques (crédit photo JL. Michotey) ....25

Photo n° 10 : construction du viaduc de Verteuil (16) (crédit photo Gilles Pinganaud) ....26

Photo n° 11 : travaux de réfection lourds (crédit photo JL. Michotey ....26

Photo n° 12 : effondrement d'un pont en maçonnerie en cours de travaux (crédit photo D. Poineau) ....34

Photo n° 13 : élément préfabriqué pour radier préfabriqué (crédit photo JP. Levillain) ....64

Photo n° 14 : exemple de protection des sols au pourtour des appuis par un rideau de palplanches (crédit photo JP. Levillain) ....66

Photo n° 15 : batardeau de mise à sec des appuis (crédit phot JP. Levillain) ....68

Photo n° 16 : élargissement de la base d'un appui par un voile en béton. Bien souvent, un "cache-misère" donnant l'illusion de la sécurité (crédit photo JP. Levillain) ....77

Photo n° 17 : coffrage d'un corset en béton armé (crédit photo JP. Levillain) ....79

Photo n° 18 : système malaxeur et mélangeur (crédit photo Chemgroot ) ....124

Photo n° 19 : pompe à pistons (crédit photo Atlas Copco) ....125

Photo n° 20 : principe de fonctionnement d'une pompe à membrane (crédit photo Tapflo ) ....125

Photo n° 21 : pompe à vis (crédit photo PCM) ....126

Photo n° 22 : pompe péristaltique (crédit photo PCM) ....126

Photo n° 23 : centrale d'injection (crédit photo A. Bouineau) ....127

Photo n° 24 : détail d'un dispositif de mesure de la pression et du débit d'injection (crédit photo DIMTI) ....132

Photo n° 25 : tube à manchette équipé d'un capteur de pression (crédit photo A. Bouineau) ....133

Photo n° 26 : enregistreur XY (crédit photo A. Bouineau) ....133

Photo n° 27 : essais avec deux colonnes de sable (crédit photo A. Bouineau) ....134

Photo n° 28 : cône de Marsh (crédit photo WIKIPEDIA) ....134

Photo n° 29 : balance de baroid (crédit photo Lab X) ....135

Photo n° 30 : décollement entre le bandeau et le corps de voûte du pont du nid d'oie à Clisson (crédit photo CETE de l'Ouest - Jacques Billon) ....143

Photo n° 31 : fissure longitudinale dans une voûte (crédit photo IQOA) ..... 143

Photo n° 32 : décollement entre le tympan et le bandeau du pont du nid d'oie à Clisson (crédit photo CETE de l'Ouest - Jacques Billon) ..... 144

Photo n° 33 : combinaison de plusieurs désordres (décollement du bandeau, écrasement et fendage de pierres…) (crédit photo LRPC) ..... 144

Photo n° 34 : tirants d'enserrement du bandeau et tirants supplémentaires pour les murs tympans (crédit photo CETE de l'Ouest - Hervé Foucher) . 146

Photo n° 35 : réparation provisoire d'un bâtiment au Kremlin-Bicêtre (crédit photo D. Poineau) ..... 147

Photo n° 36 : tirants d'enserrement d'un bâtiment dans les Hautes-Alpes (crédit photo D. Poineau) ..... 148

Photo n° 37 : tirants d'enserrement d'un pavillon en région parisienne (crédit photo D. Poineau) ..... 148

Photo n° 38: renforcement d'un monument à Rome (crédit photo D. Poineau) ..... 149

Photo n° 39 : étriers suspentes d'un linteau de la basilique Saint-Pierre de Rome (crédit photo D. Poineau) ..... 149

Photo n° 40 : boulons d'ancrage ponctuel « roofex » (crédit photo Atlas Copco) ..... 154

Photo n° 41 : tirant d'enserrement avec tête d'ancrage en croix de Saint-André. La protection de l'extrémité de la barre n'est pas assurée (crédit photo JL. Michotey) ..... 159

Photo n° 42 : détail du scellement des armatures de renfort dans les murs (crédit photo A. Bouineau) ..... 161

Photo n° 43 : renfort par armatures noyées dans les murs d'un bâtiment (crédit photo A. Bouineau) ..... 161

Photo n° 44 : chaînage périphérique en tête des murs extérieurs et plaque d'ancrage scellée dans le chaînage lors du bétonnage de ce dernier ..... 162

Photo n° 45 : pièce centrale permettant la mise en tension des tirants fixés sur les différentes plaques d'ancrage ..... 162

Photo n° 46 : mise en place d'armatures de précontrainte (crédit photo DDE 52) ..... 166

Photo n° 47 : armatures en composites pour béton armé (crédit photo Freyssinet) .... 167

Photo n° 48 : forage au marteau hors trou pour la création d'une niche (crédit photo CETE de l'Ouest - Jacques Billon) ..... 182

Photo n° 49 : forage dans le corps de voûte marteau hors trou (crédit photo Cofex Littoral) ..... 183

Photo n° 50 : sortie du taillant (crédit photo Cofex Littoral) ..... 185

Photo n° 51 : pompe d'injection du système MAI (crédit photo Atlas Copco) ..... 186

Photo n° 52 : carottage avec une couronne diamantée (crédit photo D. Poineau) ..... 186

Photo n° 53 : meuleuse disqueuse et rainureuse (crédit photo D. Poineau).....187

Photo n° 54 : matériel de vidéo pour examen de canalisations et forages (crédit photo D. Poineau).....188

Photo n° 55 : cabine d'enregistrement des images de la caméra vidéo (crédit photo D. Poineau).....188

Photo n° 56 : remplissage des trous avant scellement de barres (crédit photo Parexlanko).....191

Photo n° 57 : pompe d'injection du procédé MAI Systems ® (crédit photo Atlas Copco).....191

Photo n° 58 : pistolet manuel d'injection (crédit photo Freyssinet).....194

Photo n° 59 : forage du bandeau et de la voûte au pont des Abarines (crédit photo Cofex Littoral).....198

Photo n° 60 : plaque de répartition (crédit photo Cofex Littoral).....210

Photo n° 61 : forage des tympans pour le passage des tirants d'enserrement (crédit photo DDE 52).....213

Photo n° 62 : mise en place de tirants d'enserrement actifs (crédit photo DDE 52)....213

Photo n° 63 : pont dit de 100 mètres, niches de logement des ancrages (crédit photo DDE 52).....215

Photo n° 64 : pont dit de 100 mètres, plaque de répartition dans sa niche (crédit photo DDE 52).....216

Photo n° 65 : pont dit de 100 mètres aspect des parties restaurées, le ravalement des maçonneries n'ayant pas été prévu au marché (crédit photo DDE 52).....216

Photo n° 66 : contrôle à l'aide de l'analyse de la réponse vibratoire des tirants d'une paroi (crédit photo A. Bouineau).....223

Photo n° 67 : acquisition des mesures (crédit photo A. Bouineau).....224

Photo n° 68 : acquisition des mesures (crédit photo A. Bouineau).....224

Photo n° 69 : contrôle d'un tirant ancien (crédit photo A. Bouineau).....225

Photo n° 70 : longrine d'appui en partie basse de la contre-voûte préfabriquée du pont de Levallois (crédit-photo D. Poineau).....235

Photo n° 71 : déplacement de la contre-voûte préfabriquée (crédit photo D. Poineau) .238

Photo n° 72 : coffrage avec des éléments de buse, ici uniquement au niveau de la base des voiles en béton armé de renforcement des murs tympan (crédit photo Michel Daugreilh).....242

Photo n° 73 : scellement des épingles au pont de Favernay (crédit photo DDE 70).....247

Photo n° 74 : rescindement de la voûte endommagée du pont de Favernay (crédit photo DDE 70).....248

Photo n° 75 : contre-voûte en béton projeté du pont de Favernay terminée (crédit photo DDE 70) ..... 248

Photo n° 76 : état d'un extrados après décaissement et avant nettoyage (crédit photo SETRA) ..... 249

Photo n° 77 : vue du pont de Saint-Ouen et du ceinturage de la pile (crédit photo J. Mossot - Structurae) ..... 254

Photo n° 78 : vérinage d'une des voûtes du pont de Tomblaine (crédit photo Division des Ouvrages d'Art du CETE de l'Est) ..... 257

Photo n° 79 : vérin provisoire à gauche et bloc vérin définitif à droite (crédit photo Division des Ouvrages d'Art du CETE de l'Est) ..... 258

Photo n° 80 : les déformations du pont de Villeneuve-Loubet avant travaux (crédit photo CG 06) ..... 258

Photo n° 81 : dispositif de vérinage (crédit photo P. Vion) ..... 260

Photo n° 82 : vérinage en cours avec ouverture de la voûte (crédit photo P. Vion) ..... 260

Photo n° 83 : ouverture du joint accompagnée d'un déplacement transversal en l'absence d'épingles ou de tirants d'enserrement (crédit photo P. Vion) ..... 261

Photo n° 84 : effondrement du pont du Réart causé par des travaux sur les fondations (crédit photo D. Poineau) ..... 270

Photo n° 85 : pont dit de 100 mètres (ancien pont ferroviaire) avant son élargissement (crédit photo DDE 52) ..... 271

Photo n° 86 : état de l'intrados d'une voûte en pierres très sensibles au gel (crédit photo LRPC) ..... 274

Photo n° 87 : accumulation de branches pouvant créer un phénomène d'embâcle (crédit photo IQOA) ..... 275

Photo n° 88 : élargissement du pont de Gignac au niveau des travées de rive (crédit photo Parexlanko) ..... 276

Photo n° 89 : pont surbaissé de Favernay qui pourrait être compatible (après réparations) avec une dalle générale appuyée sur le remplissage (crédit photo DDE 70) ..... 279

Photo n° 90 : pont très étroit à arches de faible portée qui pourrait être compatible avec une dalle générale appuyée sur les tympans, voire sur les tympans et le remblai (crédit photo D. Poineau) ..... 279

Photo n° 91 : pont de dit de 100 mètres après élargissement par une dalle générale appuyée sur le remplissage (crédit photo DDE 52) ..... 280

Photo n° 92 : désordres dus à l'appui de l'élargissement sur un avant-bec mal fondé (crédit photo LRPC) ..... 289

Photo n° 93 : élargissement du pont de la Concorde entre 1930 et 1932 (crédit photo D. Poineau) ..... 294

Photo n° 94 : détail de l'élargissement du pont de la Concorde (crédit photo D. Poineau) ..... 294

Photo n° 95 : mauvaise étanchéité du joint longitudinal entre l'ancien et le nouvel ouvrage (crédit photo CDOA Corse) ..... 295

Photo n° 96 : mauvaise réalisation du joint longitudinal entre l'ancien et le nouvel ouvrage et débouchés superficiels très différents (crédit photo CDOA Corse) ..... 296

Photo n° 97 : coffrage pour la réalisation de la dalle générale d'élargissement du pont de Villeneuve-Loubet (crédit photo P. Vion) ..... 299

Photo n° 98 : équipage mobile utilisé pour la réalisation de la dalle générale d'élargissement du pont dit de 100 mètres (crédit photo DDE 52) ..... 299

Photo n° 99 : débouché insuffisant (extrait Directmatin du lundi 12 septembre 2009 (photo AFP) ..... 300

Photo n° 100 : création d'une nouvelle voûte sous l'aqueduc d'Arcueil-Cachan (crédit photo D. Poineau) ..... 301

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau n° 1 : domaine d'application des coulis ..... 83

Tableau n° 2 : coulis usuels en terrain meuble ..... 84

Tableau n° 3 : limites d'injectabilité ..... 85

Tableau n° 4 : injectabilité des produits d'injection ..... 118

Tableau n° 5 : exemples de coulis stabilisés et non stabilisés de régénération ..... 121

Tableau n° 6 : exemple de coulis de collage ..... 122

Tableau n° 7 : conditions d'emploi des boulons d'ancrage en tunnel ..... 152

Tableau n° 8 : quelques limites d'emploi des boulons d'ancrage dans les ponts et murs en maçonnerie ..... 152

Tableau n° 9 : dimensions des boulons d'ancrage ..... 154

Tableau n° 10 : caractéristiques mécaniques des boulons d'ancrage ..... 154

Tableau n° 11 : aciers de construction ..... 171

Tableau n° 12 : tableau comparatif des méthodes de forage dans la maçonnerie ..... 181

Le comité de pilotage des guides «Maçonnerie» était composé de :

**Christian TRIDON,** président du STRRES
**Bernard FARGEOT,** président d'honneur du STRRES
**Hubert LABONNE,** vice-président d'honneur du STRRES

| | |
|---|---|
| **Didier CHABOT** | COFEX ILE-DE-FRANCE |
| **Gil CHARTIER** | RCA |
| **Gérard COLLE** | COFEX LITTORAL |
| **Jean-Pierre GADRET** | SOLETANCHE BACHY |
| **Christian TOURNEUR** | FREYSSINET |

Les guides «Maçonnerie» ont été rédigés par :

**Daniel POINEAU** (expert) et **Alain BOUINEAU** (expert)

avec la participation de :

| | |
|---|---|
| **Jean-Pierre LEVILLAIN** | (JPL conseil) |
| **Gilles PINGANAUD** | (PAREXLANKO) |
| **Christian TRIDON** | (ARTEM) |
| **Gérard COLLE** | (COFEX LITTORAL) |
| **Bernard PLU** | (SNCF) |

Ce document a été réalisé avec le concours
de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP)
et de la Fédération Française du Bâtiment (FFB)

I Retour au sommaire I